

Clasificación morfológica foliar mediante procesamiento de imágenes

Jesus Izurieta Veliz Cristian Aquino Apaza

28 de julio de 2020

Resumen

El reconocimiento de objetos en imágenes y su clasificación es un problema ampliamente estudiado en la actualidad, y cuando es necesario aplicarlo, en general suele pensarse en una solución que implemente redes neuronales y una gran cantidad de imágenes de prueba para entrenarlas, sin embargo, en algunos casos específicos, este problema puede tener soluciones más sencillas y rápidas de implementar. En este caso estudiamos el problema de la clasificación morfológica de hojas de plantas, sin recurrir al uso de redes neuronales y con un número reducido de imágenes de prueba.

1. Introducción

Las redes neuronales son en general una solución eficiente para el problema de reconocimiento de objetos en imágenes, especialmente en casos en que el objeto que se quiere obtener de una imagen puede encontrarse en muchas posiciones y tener una gran cantidad de variaciones, para lo cual es necesaria una gran cantidad de imágenes de prueba de modo que la red neuronal pueda entrenarse y responder apropiadamente a una gran cantidad de situaciones. En este caso, el problema que tratamos de resolver es de una complejidad menor y puede resolverse por otros medios.

Para clasificar la hoja de una planta, necesitamos una forma de representar su forma, en este punto nos será útil el método de momentos invariantes de Hu, que genera valores que describen la forma de un objeto si tenemos su silueta. Los momentos invariantes de Hu funcionan correctamente en objetos en dos dimensiones y pueden darnos valores de una imagen que no varían ante transformaciones simples como escalado o rotación, sin embargo, no nos serán útiles para transformaciones en tres dimensiones, por lo tanto, su aplicación en este problema lo convierte

en una buena opción, ya que en general, para observar correctamente la hoja de una planta, suele acomodársela de modo que su forma se puede observar claramente.

Como un proceso previo a la clasificación de una hoja por la forma que tiene, tendremos que encontrar la manera de obtener su silueta de la forma más limpia posible, por lo que utilizamos también técnicas de preprocesado de imágenes como binarización de imágenes Otsu, que nos permite separar objetos en una imagen según la disposición del histograma de la imagen.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo general

- Desarrollo de una biblioteca para reconocer y clasificar hojas de plantas en imágenes sin hacer uso de métodos avanzados de inteligencia artificial como redes neuronales.

1.1.2. Objetivos específicos

- Desarrollo de una biblioteca que permita una cómoda manipulación de imágenes para su procesamiento.
- Expansión de la biblioteca de procesamiento de imágenes implementando diferentes algoritmos de preprocesamiento de imágenes.
- Desarrollo de un notebook destallando paso a paso el uso de la biblioteca para este caso específico.

2. Metodología

Este trabajo constituye un análisis descriptivo de la aplicación de diversos métodos de procesamiento de imágenes, que son aplicados a este problema específico para comprobar sus resultados. Se parte de la hipótesis inductiva de que las técnicas usadas nos servirán para conseguir los objetivos de este proyecto. Estas técnicas que fueron diseñadas para diferentes etapas del procesamiento de imágenes, pueden aplicarse secuencialmente, ya que cada una corresponde a una tarea específica que será complementada por las demás.

Seguimos entonces una secuencia de acciones con la finalidad de cumplir el objetivo de clasificar una hoja en una imagen digital, siguiendo los pasos como se muestra a continuación:

Binarización de la imagen → Descripción morfológica → Clasificación → Comparación

Cada uno de estos pasos implementa de forma independiente una técnica de procesamiento de imágenes, por lo tanto, la imagen de prueba pasará de forma secuencial por cada uno de estos procesos, siendo la salida de uno, la entrada del siguiente.

El proceso de binarización de una imagen nos permite separar los objetos de interés de una fotografía, para esto usamos la técnica de filtrado Otsu, que analiza el histograma de la imagen encontrando un punto medio desde el cual podremos separar grupos de objetos por colores. Para la descripción morfológica, usamos momentos invariantes de Hu, una técnica que permite describir la forma de una imagen mediante valores numéricos que no varían ante transformaciones simples como escalado o rotación. Se analizan estadísticamente dos momentos de Hu (ϕ_1 y ϕ_2) para cada tipo de hoja de un conjunto de imágenes de prueba, con la finalidad de poder determinar áreas en el plano ϕ_1, ϕ_2 en que se encuentre cada tipo de hoja. Finalmente comparamos la posición en el plano de los momentos obtenidos de una imagen para poder clasificarla en uno de estos grupos con cierta probabilidad de pertenencia según su distancia al centro de gravedad de cada conjunto.

3. Morfología foliar

La morfología foliar es una disciplina que clasifica las hojas de las plantas por la forma que tienen, pueden clasificarse según diferentes atributos como la forma del limbo, tipos de ápices foliares, tipos de bases, tipos de vernación y nerviación y si son o no compuestas.

En la figura 1 se pueden apreciar las diferentes partes por las que las hojas son clasificadas. En este trabajo, por simplicidad, tomamos en cuenta sólo la clasificación por la forma del limbo en hojas simples, de modo que distinguiremos las siguientes formas:

- lanceolada
- flabelada
- acuminada
- orbicular
- romboide
- ovada
- astada

- palmeada
- sagitada

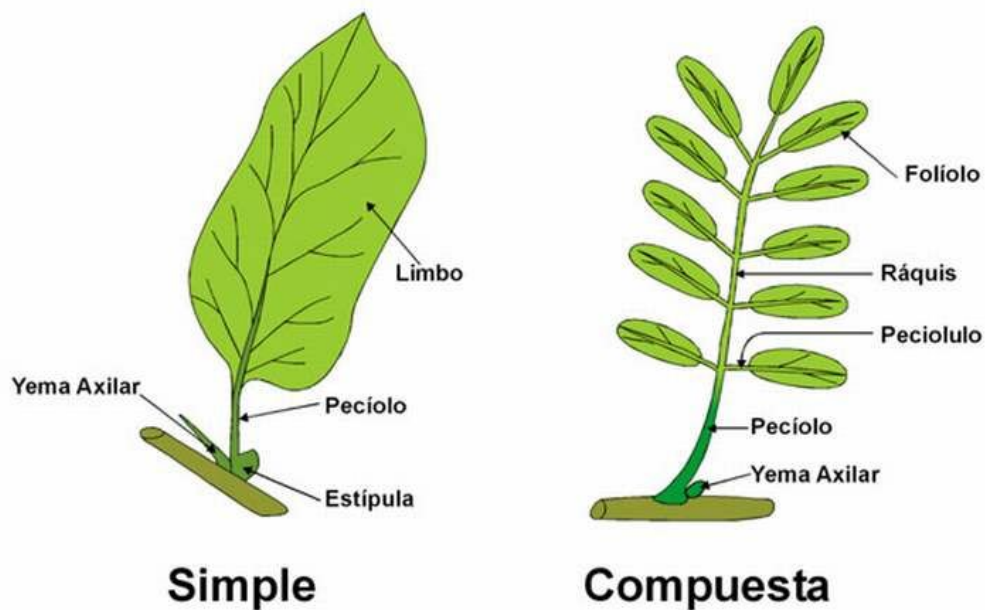


Figura 1: Partes de una hoja.

4. Desarrollo

Para este proyecto desarrollamos una librería que nos ayude a manipular una imagen, proveyendo las funciones de convolución, modificación píxel a píxel, histograma, cargado de imágenes y la capacidad de convertirlas en matrices y viceversa, además de implementar los filtros necesarios para clasificar imágenes.

El proyecto no contará con una interfaz gráfica, sino que constará de un notebook interactivo de jupyter en el que se podrá apreciar tanto el código fuente como los resultados de cada paso del proceso de manipulado de las imágenes.

4.1. Representación de imágenes

Primeramente definiremos algunos conceptos que utilizaremos en el desarrollo del proyecto. Para el tratamiento de una imagen digital, la representaremos como una función de la posición de sus píxeles como sigue:

$$I : \mathbb{N}^2 \rightarrow [0, 1]$$

$$I(x, y)$$

Donde el rango representa el nivel de luminosidad para los píxeles en coordenadas x e y en el caso de imágenes en escala de grises, para imágenes a color, tendremos en su lugar una tupla de tres elementos, uno para cada uno de los colores rojo, verde y azul. En el caso de una imagen digital, estos valores varían en el rango $[0, 255] \in \mathbb{N}$.

4.2. Manipulación de imágenes

La clase imagen es una abstracción básica que nos permitirá acceder y manipular fácilmente una imagen que puede ser cargada desde un archivo, o puede ser creada desde un array y posteriormente mostrada en un notebook de jupyter.

Load file: (Parámetros: ruta) Carga en la instancia la imagen que se encuentra en la ruta y la convierte en una matriz de tuplas de 3 componentes, uno por cada color RGB, almacenándola en el atributo `array` de la clase imagen, además define otros atributos como las dimensiones de la imagen.

Load array: (Parámetros: array) Almacena una matriz en el atributo `array` de la imagen, la matriz debe ser contener tuplas de tres valores que se encuentren entre 0 y 255.

Show: Retorna un objeto `PIL.Image.Image` que permite visualizar la imagen en un notebook de jupyter o almacenarla como un archivo.

I: (Parámetros: x, y) Representa la función $I(x, y)$ definida previamente, retorna los píxeles en la posición x, y como una tupla de 3 valores.

I normal: (Parámetros: x, y) Igual que `I()` pero en lugar de retornar valores en el rango $[0, 255]$ normaliza los valores al rango $[0, 1]$.

I m: (Parámetros: x , y , color) Igual que $I()$, pero retorna un único valor definido por el parámetro `color`, 0 para rojo, 1 para verde y 2 para azul, el valor por defecto es rojo si no se define el parámetro `color`.

I mnormal: (Parámetros: x , y , color) Igual que $I_m()$ pero con valores normalizados en el rango $[0, 1]$.

Iterator: Retorna un iterador de tuplas x , y que facilita iteraciones sobre cada píxel de la imagen.

Map over: (Parámetros: `func`) Permite sobrescribir píxeles mediante una función que se envía como parámetro, la función recibirá una tupla de 3 valores y debe devolver una tupla de 3 valores. Esta función nos permitirá recorrer la totalidad de la imagen aplicando en cada pixel la función `func`, por ejemplo el código `img.map_over(lambda x, y, z: (x, x, x))` ejecutado sobre una imagen `img2`, permitirá cambiar el valor de cada canal por su valor rojo, lo que convertirá a la imagen a blanco y negro.

4.3. Procesamiento

El procesamiento de una imagen para su posterior clasificación, consiste en la separación de la parte de interés de la imagen (en este caso la hoja), de modo que pueda apreciarse su forma sin objetos de fondo, esto se realizará usando el método de filtrado de Otsu, posteriormente se obtendrán los momentos invariantes de Hu de la imagen, que describen la forma que tiene la hoja.

4.3.1. Segmentación de umbral de Otsu

La segmentación de una imagen por el método de Otsu consiste en separar un objeto en una imagen de otros objetos que no nos son de interés, para esto trabajamos sobre el histograma de una imagen, que representa la frecuencia en que aparecen los colores en una imagen, un ejemplo de histograma separado por colores rojo, verde y azul se puede ver en la figura 2

El problema de la segmentación de objetos en una imagen es un problema de minimización, cuando encontramos una imagen en que el objeto de interés tiene un color diferente al color de fondo, el histograma de la imagen toma una disposición bimodal como se muestra en la figura 3, trabajaremos con imágenes convertidas a blanco y negro para tener un único histograma en el que realizar la separación.

Como se ve en la imagen 3, el histograma bimodal tiene una clara separación en la que podemos separar dos grupos de colores, el punto de separación se encontrará en el punto mínimo de

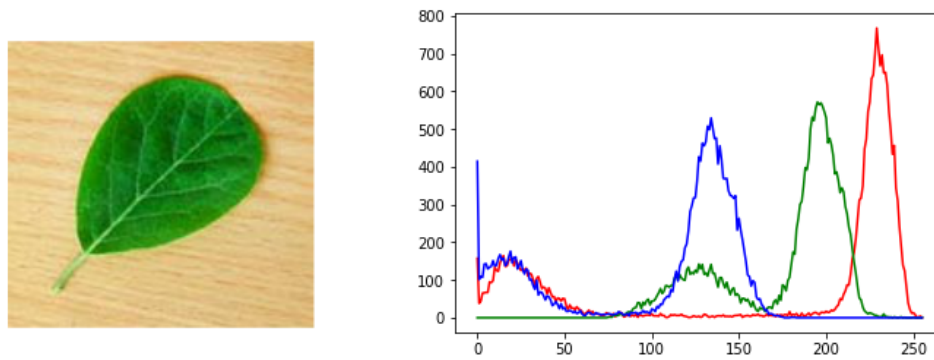


Figura 2: Histogramas por color en una imagen.

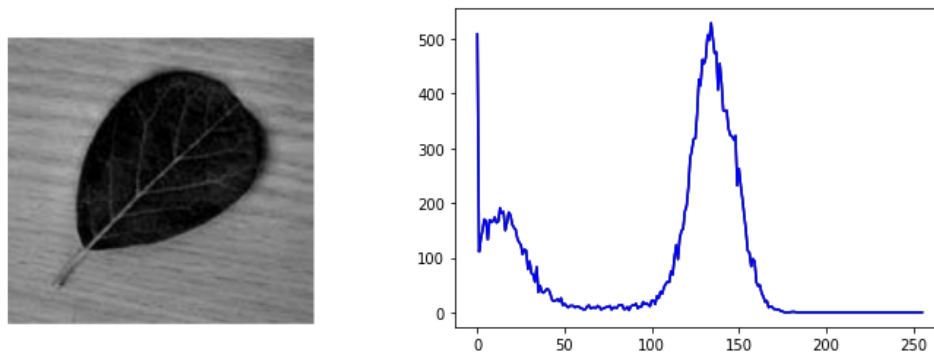


Figura 3: Histograma de la imagen en blanco y negro, se puede apreciar un valle entre los valores 50 a 100 que separa dos grupos de colores.

ese valle, una vez encontrado este punto, podemos binarizar la imagen separándola por umbrales, de modo que el resultado es algo similar a la figura 4.



Figura 4: Imagen binarizada tomando el valor 75 para separar los umbrales de color.

La finalidad del método de Otsu es encontrar este punto mínimo en que la separación de umbrales de color es óptima, esto se consigue encontrando el valor t que minimiza la función:

$$\sigma_w^2(t) = q_1(t)\sigma_1^2(t) + q_2(t)\sigma_2^2(t) \quad (1)$$

En esta función t es la variable que debe ser minimizada y representa el punto medio que dividirá los dos umbrales. Las funciones $q_1(t)$ y $q_2(t)$ representan la probabilidad de cada grupo se definen como sigue:

$$q_1(t) = \sum_{i=1}^t P(i), \quad q_2(t) = \sum_{i=t+1}^I P(i)$$

Para obtener estos valores, necesitamos normalizar nuestro histograma de modo que su área sea igual a 1 y de este modo se convierta en una función de probabilidad para cada valor de píxel, esta función normalizada es $P(i)$, lo que hacen las funciones $q_1(t)$ y $q_2(t)$ es separar esta función en dos partes, una de 0 a t y otra de $t+1$ hasta I que es en este caso es 255. Seguidamente obtenemos la media de ambas clases:

$$\mu_1(t) = \sum_{i=1}^t \frac{iP(i)}{q_1(t)}, \quad \mu_2(t) = \sum_{i=t+1}^I \frac{iP(i)}{q_2(t)}$$

Y después de obtener la media de ambas clases, calculamos su varianza.

$$\sigma_1^2(t) = \sum_{i=1}^t [i - \mu_1(t)]^2 \frac{P(i)}{q_1(t)}, \quad \sigma_2^2(t) = \sum_{i=t+1}^I [i - \mu_2(t)]^2 \frac{P(i)}{q_2(t)}$$

Con las funciones de probabilidad $q_1(t)$ y $q_2(t)$ y con la varianza de estas, podemos obtener la ecuación 1, que representa la varianza de pesos por clase¹. Tendremos ahora que minimizar esta función, para esto, la solución más sencilla consiste en evaluar esta función para cada valor de 0 a 255 y seleccionar el valor mínimo para t , ya que computacionalmente, el cálculo de $\sigma_w^2(t)$ para cada t no tiene mucha complejidad.

Los métodos `minimum_otsu` y `binarize` implementan esta técnica, `minimum_otsu` se ocupa de calcular el valor t que minimiza la varianza, y `binarize` cambia los valores de los píxeles de la imagen, dependiendo si se encuentran a la derecha o izquierda del valor t , dando como resultado, una imagen como la figura 4. El código puede encontrarse en la sección Anexos.

4.3.2. Momentos invariantes de Hu

Para obtener un valor propio de la forma geométrica de un objeto en una imagen, usaremos momentos invariantes de Hu, un conjunto de valores calculados en base a la imagen, que nos permiten describir su forma y que permanecen constantes aún cuando se aplican sobre la imagen transformaciones como rotada o escalado.

Los momentos de orden $(p + q)$ en dos dimensiones sobre una función de distribución $p(x, y)$ continua, son calculados mediante integrales de Riemman como sigue:

$$m_{pq} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} x^p y^q p(x, y) dx dy \quad p, q = 0, 1, 2, \dots$$

En este caso, usaremos momentos centrales que se definen como sigue para una función $p(x, y)$ continua:

$$\mu_{pq} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} (x - \bar{x})^p (y - \bar{y})^q p(x, y) d(x - \bar{x}) d(y - \bar{y})$$

donde:

$$\bar{x} = \frac{m_{10}}{m_{00}}, \quad \bar{y} = \frac{m_{01}}{m_{00}}$$

son las coordenadas del centroide² del objeto en la imagen.

Sin embargo, ya que se trata de una imagen digital en que usamos valores discretos, calcularemos los momentos centrales con las ecuaciones:

¹Traducido de *weighted within-class variance*.

²Centro de gravedad.

$$\mu_{pq} = \sum_x \sum_y x^p y^q I(x, y)$$

$$n_{pq} = \frac{\mu_{pq}}{\mu_{00}^r}, \quad r = \frac{p+q}{2} + 1$$

Con estas ecuaciones podremos calcular los momentos invariantes que usaremos en este proyecto. Nos limitamos a usar los primeros dos momentos invariantes de Hu, ya que nos son suficientes en este caso.

$$\phi_1 = n_{20} + n_{02}, \quad \phi_2 = (n_{20} + n_{02})^2 + 4n_{11}^2$$

Estos dos valores representan la extensión y la estrechez del objeto respectivamente³. Este proceso es implementado en el método `hu_moments` de la clase `image`, retornando los dos primeros momentos.



Figura 5: Imagen de una estrella con transformaciones, primero la imagen original, luego escalada, luego rotada y finalmente escalada y deformada.

Probando el algoritmo con las tres imágenes de ejemplo de la figura 5 obtenemos los valores:

	ϕ_1	ϕ_2
Imagen 1	0.2162437035817964	7.15421105863606e-10
Imagen 2	0.21685851808651274	4.778874641818779e-09
Imagen 3	0.2162170223369867	6.370439738565976e-09
Imagen 4	0.23248362379752913	0.007129570200901847

Los valores de ϕ_1 y ϕ_2 para las primeras tres transformaciones son muy similares debido a que se trata de la misma forma en diferentes tamaños y posiciones, mientras que los momentos de la imagen 4 varían notablemente por estar deformada.

³Traducido de *spread* y *slenderness* en el artículo original.

4.4. Datos de comparación

Para obtener datos de comparación, recolectamos algunas imágenes de ejemplo que nos servirán para tener valores iniciales de momentos invariantes para diferentes tipos de hojas (Figura 6).

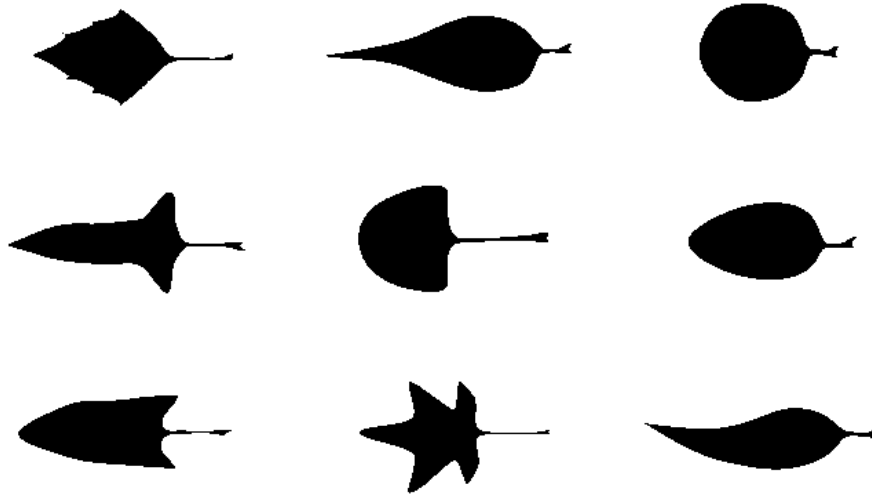


Figura 6: Imágenes de prueba de los tipos de hojas que clasificamos.

Aplicando las técnicas de filtrado de Otsu y momentos invariantes de Hu, obtenemos los valores de ϕ_1 y ϕ_2 para las imágenes de prueba.

Cuadro 1: Momentos invariantes obtenidos de las imágenes de ejemplo.

Tipo de hoja	ϕ_1	ϕ_2
Lanceolada	0.08241080043135868	0.3999693426853134
Flabelada	0.02452288351987129	0.3207811493752293
Acuminada	0.05055337469475332	0.3610066090495226
Orbicular	0.020097387958003515	0.31300964425473893
Romboide	0.04190473916737033	0.34816780188557916
Ovada	0.023285971562215516	0.35150337160513034
Astada	0.033590539033761975	0.3190729877395031
Palmeada	0.012872876070329099	0.2860389435844065
Sagitada	0.06468482190387434	0.4117437381830096

En la figura 7 podemos ver cómo se distribuyen los momentos de las imágenes en el plano.

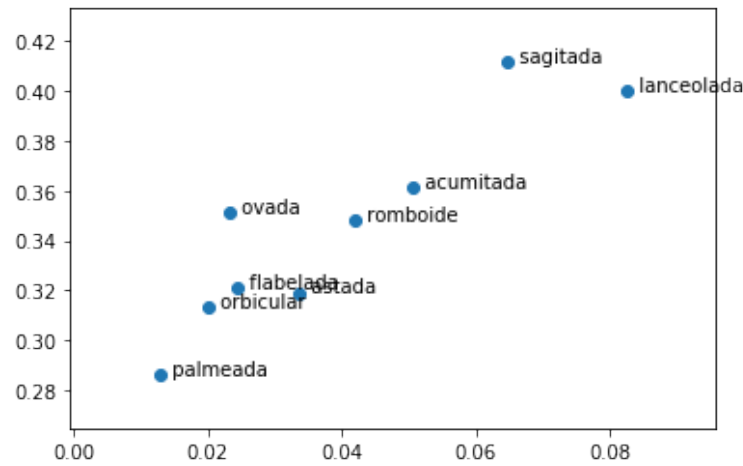


Figura 7: Distribución de momentos invariantes por tipo de hoja en el plano ϕ_1, ϕ_2 .

4.5. Comparación y clasificación

Para comparar los resultados de momentos de una imagen con valores obtenidos previamente, el algoritmo ideal a ser utilizado es K-nearest neighbors.

4.5.1. Algoritmo K-Nearest Neighbors

K-Nearest Neighbors, o KNN para abreviar, es uno de los algoritmos de aprendizaje automático más simples y se utiliza en una amplia gama de instituciones. KNN es un algoritmo de aprendizaje lento no paramétrico. Cuando decimos que una técnica no es paramétrica, significa que no hace suposiciones sobre los datos subyacentes. En otras palabras, realiza su selección en función de la proximidad a otros puntos de datos, independientemente de la característica que representen los valores numéricos. Ser un vago algoritmo de aprendizaje implica que hay poca o ninguna fase de entrenamiento. Por lo tanto, podemos clasificar inmediatamente los nuevos puntos de datos a medida que se presentan.

Algunos pros y contras de KNN

1. Pros :
 - No hay suposiciones sobre los datos.
 - Algoritmo simple - fácil de entender
 - Se puede usar para clasificación y regresión
2. Contras :

- Requisito de memoria alta: todos los datos de entrenamiento deben estar presentes en la memoria para calcular los K vecinos más cercanos
- Sensible a características irrelevantes
- Sensible a la escala de los datos ya que estamos calculando la distancia a los puntos K más cercanos.

4.6. Ejecución y resultados

Ahora procedemos a utilizar la biblioteca desarrollada con una imagen de ejemplo que podremos clasificar. Primeramente importamos las bibliotecas que usaremos.

```
from image import Image
import matplotlib.pyplot as plt
```

Cargaremos las imágenes de prueba que mostramos previamente en la figura 6.

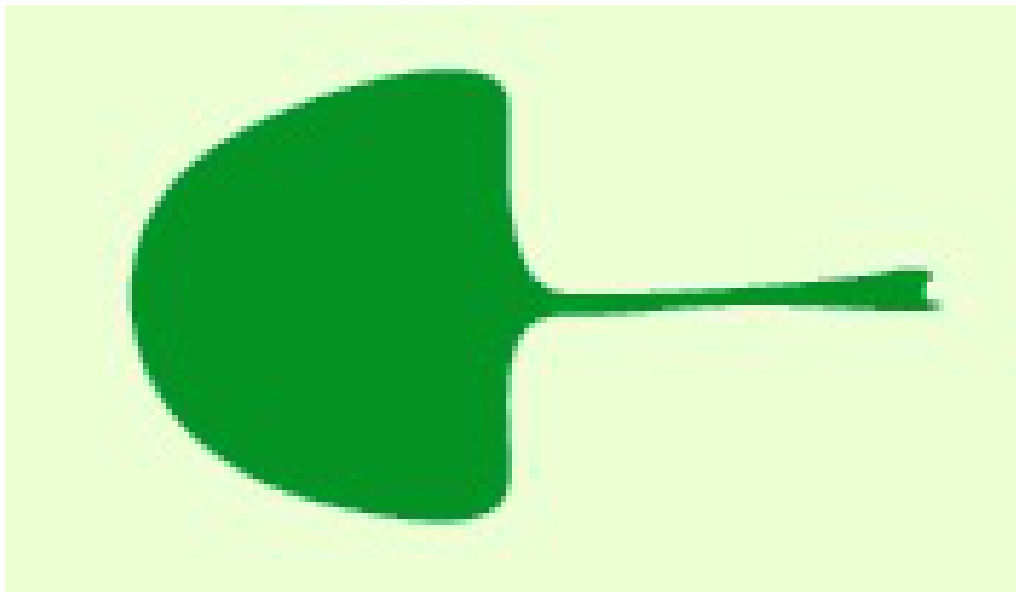
```
lanceolada = "./testimages/leafs/lanceolada.jpg"
flabelada = "./testimages/leafs/flabelada.jpg"
acumitada = "./testimages/leafs/acumitada.jpg"
orbicular = "./testimages/leafs/orbicular.jpg"
romboide = "./testimages/leafs/romboide.jpg"
ovada = "./testimages/leafs/ovada.jpg"
astada = "./testimages/leafs/astada.jpg"
palmeada = "./testimages/leafs/palmeada.jpg"
sagitada = "./testimages/leafs/sagitada.jpg"
```

```
leafs=[lanceolada, flabelada, acumitada, orbicular, romboide, ovada, astada, palmeada,
```

Podemos abrir una de estas imágenes para comprobar que se hayan cargado correctamente:

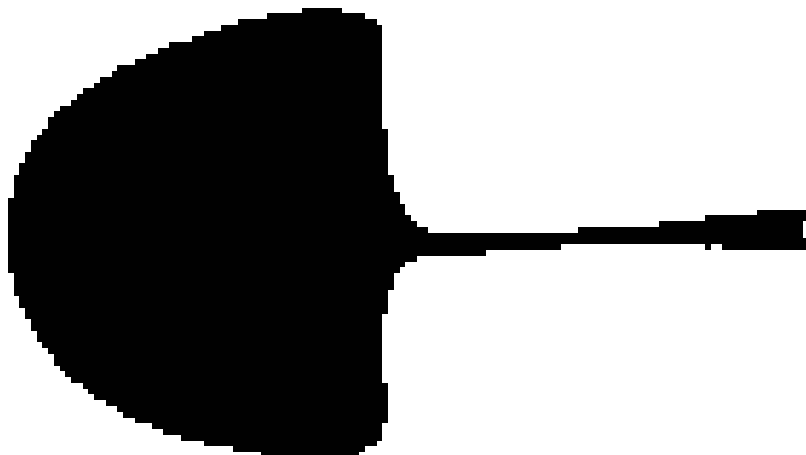
```
l1 = Image()
l1.load_file(flabeleda)
l1.show()
```

Nos mostrará la imagen:



A continuación hacemos una copia de la imagen y calculamos sus momentos invariantes

```
lle = ll
bound = lambda x: 255 if x > 200 else 1
lle.map_over(lambda r, g, b: (bound(g), bound(g), bound(g)))
lle.show()
print(ll.hu_moments())
```



Como resultado obtenemos: (0.29768184782794443, 0.021067187247205375). Rea-

lizaremos este proceso de forma iterativa para cada una de las imágenes de prueba, para esto desarrollamos las funciones `binarize` y `getmoments`.

```
def binarize_(url):
    ll = Image()
    ll.load_file(url)
    ll.map_over(lambda r, g, b: (bound(b), bound(b), bound(b)))
    return ll

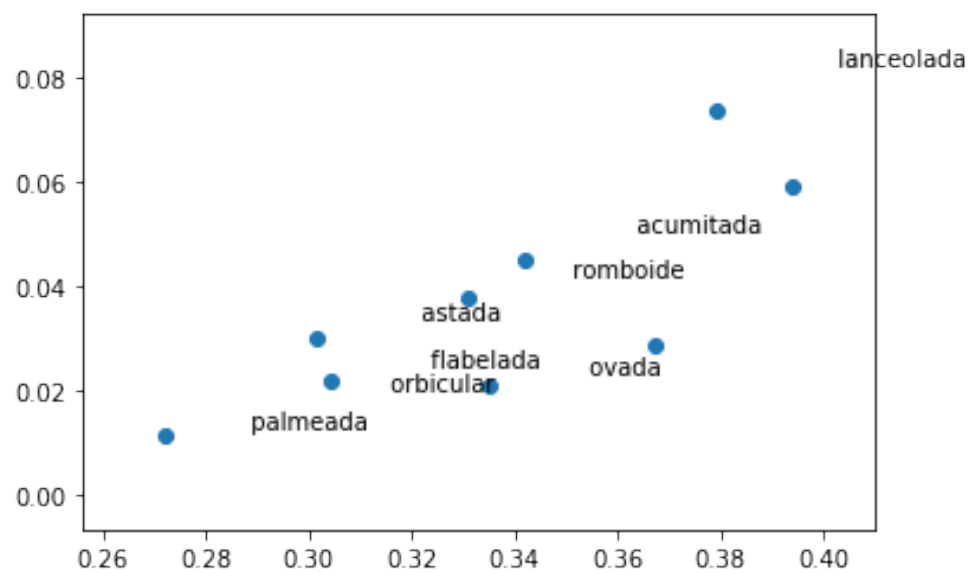
binary_leafs = map(binarize_, leafs)
hu_moments = list(map(lambda x: x.hu_moments(), binary_leafs))

def get_moments(url):
    im = Image()
    im.load_file(url)
    return (" " + url.split("/") [3].split(".") [0], im.hu_moments())

get_position = lambda x: x[1]
```

De este modo podremos visualizar la distribución de los momentos invariantes de las imágenes en el plano.

```
hu_name_moments = list(map(get_moments, leafs))
plt.scatter(*zip(*hu_moments))
for label, moments in hu_name_moments:
    plt.annotate(label, moments)
url, moments = get_moments(leafs[1])
plt.show()
```



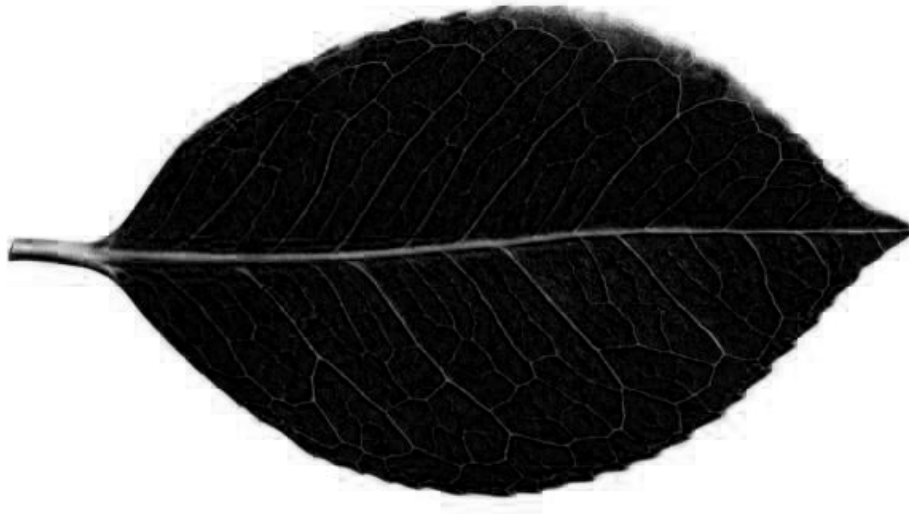
Ahora cargamos la imagen de prueba que usaremos

```
test = "./testimages/leafs/test3.jpg"  
testimage = Image()  
testimage.load_file(test)  
testimage.show()
```



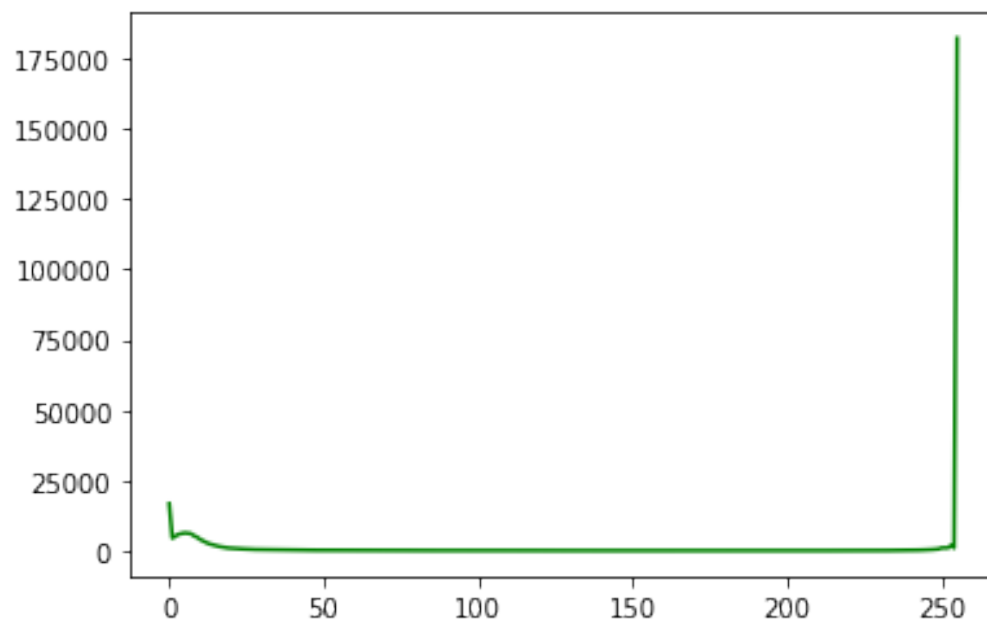

Convertimos la imagen a blanco y negro

```
testimage.black_white().show()
```



Y obtenemos su histograma

```
hist_normal = testimage.histogram()  
plt.plot(hist_normal, 'g')  
plt.show()
```



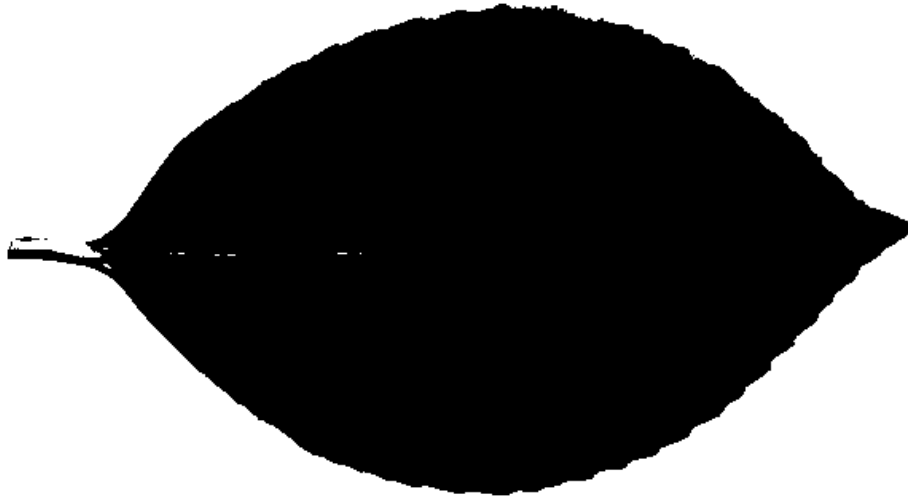
Calculamos el valor t que minimiza la varianza

```
t = testimage.minimum_otsu()  
print(t)
```

134

Y lo usamos para binarizar la imagen

```
image = testimage.copy()  
image.binarize(t).show()
```



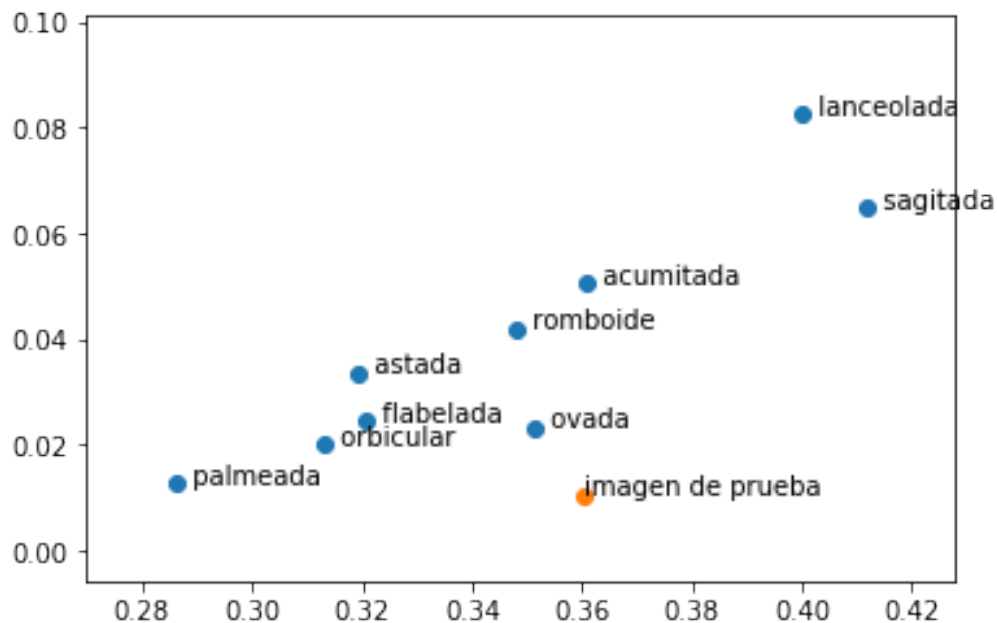
Calculamos los momentos de Hu de la imagen

```
hm = image.hu_moments()  
print(hm)
```

Y obtenemos (0.3601956207386796, 0.010512156197008187).

Finalmente agregamos la imagen a la gráfica para comprobar sus cercanía con otros valores.

```
hu_moments = list(map(get_position, hu_name_moments))  
tm = ("imagen de prueba", hm)  
  
plt.scatter(*zip(*hu_moments))  
for label, moments in hu_name_moments:  
    plt.annotate(label, moments)  
plt.scatter(*hm)  
plt.annotate(*tm)  
url, moments = get_moments(leafs[1])  
plt.show()
```



Finalmente comprobamos que a simple vista, la imagen se encuentra cerca de la forma ovada, que es la forma correcta, sin embargo se encuentra algo alejada del resultado, con más imágenes de prueba y un mejor preprocesamiento de la imagen se podrían obtener mejores resultados.

5. Referencias

- Visual pattern recognition by moment invariants
- Palmprint identification algorithm
- A threshold selection method from grey level histogram
- Reconocimiento de objetos en fotografías
- Classification of plant leaf images with complicated background

6. Anexos

6.1. Código fuente

```
#!/usr/bin/env python3
import matplotlib.image as plt_img
```

```
import numpy as np
from PIL import Image as pil_image
from functools import reduce
from math import sqrt
from copy import deepcopy

class Image:

    def __init__(self):
        self.route = "."
        self.image = None
        self.array = None
        self.height, self.width, self.dat = (0,0,0)

    def load_file(self, route):
        self.route = route
        self.image = pil_image.imread(route)
        self.array = self.image.tolist()
        self.height, self.width, self.dat = self.image.shape

    def load_array(self, array):
        self.array = array
        self.height = len(array)
        self.width = len(array[0])

    def I(self, x, y):
        """ Devuelve rgb en x, y """
        return tuple(self.array[x][y])

    def I_m(self, x, y, color=0):
        """ Devuelve un color de x, y """
        triple = self.array[x][y]
        return triple[color]
```

```
def I_normal(self, x, y):
    """ Devuelve rgb en [0, 1] """
    (i, j, k) = self.I(x, y)
    return (i/255, j/255, k/255)

def I_mnormal(self, x, y, color=0):
    """ Devuelve color en [0, 1] """
    i = self.I_m(x, y, color)
    return i/255

def show(self, route=None):
    if route:
        self.route = route
    image_arr = np.asarray(self.array, dtype="uint8")
    img_file = pil_image.fromarray(image_arr, 'RGB')
    return img_file

def iterator(self):
    for i in range(self.height):
        for j in range(self.width):
            yield (i,j)

def map_over(self, func):
    """ Ejecución de func sobre cada pixel """
    for x, y in self.iterator():
        self.array[x][y] = func(*self.I(x, y))

def copy(self):
    return deepcopy(self)

def crop(self, x1, y1, x2, y2):
    cropped_array = []
    for i in range(y1, y2):
```

```
        arr = []
        for j in range(x1, x2):
            arr.append(self.I(i, j))
        cropped_array.append(arr)
    cropped_image = Image()
    cropped_image.load_array(cropped_array)
    return cropped_image

def black_white(self):
    self.map_over(lambda r, g, b: (min(r, g, b), min(r, g, b), min(r, g, b)))
    return self

def hu_moments(self):
    """ Primeros dos momentos de Hu """
    def moment_pq(p, q):
        """ Momentos geométricos """
        sum = 0
        for x, y in self.iterator():
            sum += x**p * y**q * self.I_mnormal(x, y)
        return sum

    m00 = moment_pq(0, 0)
    m01 = moment_pq(0, 1)
    m11 = moment_pq(1, 1)
    m10 = moment_pq(1, 0)
    m20 = moment_pq(2, 0)
    m02 = moment_pq(0, 2)

    def central_moment_20(a, b, c):
        """ Momentos centrales """
        return (a-(b**2/c))/(c**2)

    n20 = central_moment_20(m20, m10, m00)
    n02 = central_moment_20(m02, m01, m00)
```



```
n11 = central_moment_20(m11, sqrt(m10*m01), m00)

self.X = n20+n02
self.Y = (n20-n02)**2+4*(n11**2)

return (self.X, self.Y)

def color_histogram(self):
    histr = [0 for _ in range(256)]
    histg = [0 for _ in range(256)]
    histb = [0 for _ in range(256)]
    for x, y in self.iterator():
        r = self.I_m(x, y, 0)
        g = self.I_m(x, y, 1)
        b = self.I_m(x, y, 2)
        histr[r] += 1
        histg[g] += 1
        histb[b] += 1
    return (histr, histg, histb)

def otsu(self):
    pass

def histogram(self):
    # hist = [(x, 0) for x in range(255)]
    hist = [0 for _ in range(256)]
    for x, y in self.iterator():
        p = self.I_m(x, y)
        hist[p] += 1
    return hist

def minimum_otsu(self):
    hist = self.histogram()
    hist_sum = sum(hist)
```

```
P = list(map(lambda x: x/hist_sum, hist))
# función de probabilidad
q1 = lambda t: sum(P[0:t])
q2 = lambda t: sum(P[t+1:256])
# media
u1 = lambda t: sum([(i * P[i]) / q1(t) for i in range(0, t)])
u2 = lambda t: sum([(i * P[i]) / q2(t) for i in range(t+1, 256)])
# varianza
v1 = lambda t: sum([(i - u1(t))**2 * (P[i] / q1(t)) for i in range(0, t)])
v2 = lambda t: sum([(i - u2(t))**2 * (P[i] / q2(t)) for i in range(t+1, 256)])
# weighted variance
vw = lambda t: q1(t) * v1(t) + q2(t) * v2(t)
minor = 100000
ret = 0
for t in range(256):
    try:
        vwt = vw(t)
        if vwt < minor:
            minor = vwt
            ret = t
    except:
        pass
return ret

def binarize(self, center):
    bound = lambda x: 255 if x > center else 0
    self.map_over(lambda r, g, b: (bound(b), bound(b), bound(b)))
    return self
```