

Índice General

1	INTRODUCCIÓN	3
1.1	Determinación del Peso de la Materia seca	5
1.2	Antecedentes	6
1.3	Objetivos	8
1.4	Propuesta del Trabajo de Tesis	8
1.5	Planteamiento del Problema	9
1.6	Estructura de la Tesis	10
2	CARACTERÍSTICAS Y CRECIMIENTO DE LA ESPINACA	12
2.1	Crecimiento de la espinaca.	12
2.2	Características de la Espinaca	13
2.3	Requerimientos de Clima	13
3	ADQUISICIÓN Y PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES DE LA ESPINACA	15
3.1	Equipo de Adquisición de Imágenes	15
3.2	Toma de Imágenes	16
3.3	Calibración, Conversión de Píxeles a Centímetros Cuadrados	19
3.4	Procesamiento Digital de Imágenes	20
3.5	Procesamiento Digital de Imágenes de las Espinacas.	23
4	EXPERIMENTOS REALIZADOS	30
4.1	Determinación Empírica del Peso de la Materia Seca	30

4.2	Determinación del Área de Hoja Foliar por medio del Procesamiento Digital de Imágenes.	31
4.3	Análisis de Imágenes	34
4.4	Tabla de Comparaciones	42
4.5	Representación Gráfica del Proceso de Crecimiento	49
	CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS	71
	APÉNDICE	75
	BIBIOGRAFÍA	79

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

En los últimos años, el uso del Procesamiento Digital de Imágenes en Agronomía se ha incrementado considerablemente, en la literatura se pueden encontrar ejemplos como [1] donde, mediante técnicas del procesamiento digital de imágenes se determina la cantidad de agua consumida por una hoja de una planta, también es posible detectar enfermedades en las plantas, al igual que se puede mejorar el control de calidad en alimentos destinados al consumo humano.

En la actualidad se busca lograr una optimización en el control del clima y del medio ambiente de un cultivo, mediante la utilización de métodos no destructivos para la medición del crecimiento de una planta, esto es, que la planta no sufra daño cuando se hacen las mediciones. La medición del crecimiento de una planta es importante porque mediante esta variable se puede determinar si es apta o no para el consumo humano.

En la universidad de Chapingo, México, se hace uso de un “Métodos Destructivos” para medir el crecimiento de las plantas en un cultivo. Este método consiste en:

Después de haber sembrado una planta en específico, se espera a la emergencia para ir recortando cada planta por día al ras del suelo para posteriormente ser quemada y pesada y así obtener un estándar conocido como el peso de la materia seca, con la cual se puede llegar a conocer aspectos importantes como la cantidad de fósforo, nitrógeno que consumió la planta, y de esta forma saber que tan recomendable es para el consumo humano o de ganado de engorda. Este método se ha utilizado por varios años no sólo en nuestro país sino en muchos otros países.

Una forma de evitar la destrucción de la planta es mediante el análisis de imágenes digitales por computadora, para obtener el crecimiento de área de hoja, el peso nuevo o seco. Existe más

desarrollo es en las frutas debido a la facilidad que presentan para analizar las imágenes digitales ya que con ellas se puede obtener textura, madurez, pero el área donde casi no hay trabajos de investigación es en las plantas por la complejidad de las imágenes, en donde se puede llegar a confundir la planta con el suelo o fondo, se ha tratado de solucionar este problema aplicando cámaras infrarrojas, ...ltros para las cámaras digitales, pero estos métodos son caros para el agricultor y en ocasiones para un investigador de esta área. El objetivo del trabajo que se propone es obtener el área de las plantas a bajo costo, sin el uso de cámaras infrarrojas, ...ltros o películas sobre la tierra del cultivo y de esta manera dar un método no destructivo para el estudio de las plantas.

Un ejemplo para comprender más la importancia del procesamiento digital de imágenes en el crecimiento de la planta es:

Supongase que se quiere sembrar maíz con mayor cantidad de fósforo que de nitrógeno y de potasio, y determinar si se obtuvo un óptimo crecimiento de la planta o es semejante al que se obtiene cuando se utiliza el mismo porcentaje de potasio, fósforo y nitrógeno. Para llevar a cabo este trabajo es necesario sembrar 360 plantas de maíz, en un terreno, y después de la emergencia (se entiende por emergencia cuando la semilla ha brotado), la planta se va recortando al ras del suelo diariamente durante el período de crecimiento del maíz, el cual consta de 4 meses, después de haber cortado la planta, está se quema a una temperatura ...ja de $80\pm C$ en un horno de circulación de aire forzado, para así obtener carbono, con el cual se puede determinar algunas características importantes de la planta. Posteriormente, se deja enfriar la planta en un desecador pesa en una balanza analítica. Lo que se pesa es llamado materia seca, en base a los resultados obtenidos diariamente se obtiene una grá...ca de crecimiento la cual describe las etapas de crecimiento: exponencial, logarítmica y lineal, cada etapa describe que tan bueno fue poner más porcentaje de fósforo. Este método es laborioso y se llegan a tener pérdidas económicas grandes por lo que se propone aquí un método mucho más simple.

Una manera alterna no destructiva de evaluar el desarrollo del cultivo es la técnica conocida como "Speaking Plant Approach" [2], la cual consiste en el análisis de imágenes digitales del cultivo, haciendo uso de las técnicas de procesamiento digital de imágenes para evaluar la materia seca acumulada mediante la determinación de elongación de hojas, densidad de color en cobertura de suelo y relación volumen v.s. área cultivada, la forma de llevar esto acabo,

es colocando una cámara digital con la que se pueda observar todo el cultivo, por medio de ella obtener fotografías diariamente para después ser analizadas en un programa que contenga conceptos utilizados en el procesamiento digital de imágenes, este programa puede ser realizado en cualquier plataforma que permita adquirir y procesar imágenes digitales.

1.1 Determinación del Peso de la Materia seca

La investigación de la fotosíntesis ha sido estimulada no sólo por la curiosidad, sino también por la convicción de que podría proporcionar un medio para aumentar la productividad en plantas y los rendimientos de los cultivos. En primer lugar, debe considerarse la relación cuantitativa entre la fotosíntesis y la productividad de las plantas. En cualquier cultivo o plantel de vegetación natural, cuatro factores determinan el aumento de biomasa o productividad neta (P_n): la cantidad de luz incidente (Q), la proporción de esa luz que es interceptada por los órganos verdes de la planta (τ), la eficiencia de la conversión fotosintética de la luz interceptada en la biomasa (ϵ) y las pérdidas respiratorias de la biomasa (R).

El proceso de la fotosíntesis da como resultado la conversión de energía luminosa en energía química. Este aporte de energía es usado por los Productores Primarios para efectuar trabajo o es almacenado. El interés básico es la energía química almacenada en la biomasa ya que es esta la que puede ser recolectada para alimento, combustible, fibra u otros usos. De manera obvia, la biomasa es de igual importancia en los ecosistemas naturales ya que proporcionan las moléculas orgánicas y la fuente de energía para todos los otros niveles tróficos o de nutrición.

La producción se define como la biomasa o peso de la materia orgánica asimilada por una comunidad o especie por unidad de superficie y por unidad de tiempo. La producción es interpretada en términos de peso seco de materia orgánica, la cual puede expresarse en cualquier cantidad almacenada como carbono o energía.

Una forma para determinar el peso seco es la siguiente:

1. Diariamente, durante todo el período de crecimiento, una planta es seleccionada aleatoriamente y recortada al ras del suelo, el crecimiento rápido del peso seco es determinado de la siguiente manera: se seca la planta a una temperatura de $80\pm C$ a $105\pm C$ por 24 horas en un horno de circulación de aire forzado; se deja enfriar, después se pesa y de esta forma

se obtiene carbono, el cual es pesado en una balanza analítica, con lo cual se obtiene el peso de la materia seca.

2. Para saber cuántas plantas deben ser sembradas en una hectárea se toma en cuenta los siguientes aspectos: ¿Cuanto tiempo dura el período de crecimiento de la planta?, este lapso de tiempo es multiplicado por dos, con este dato obtenemos el número de plantas que debemos sembrar.

Por ejemplo, el período de crecimiento de la espinaca es de 2 meses, duplicando este período se tienen 4 meses, cada mes tiene aproximadamente 30 días, por lo que se multiplican los 4 meses por los 30 días, el resultado es 120, esta última cantidad indica el número de espinacas que se deben cultivar, el motivo es porque todos los días por medio del método destructivo se recorta una planta, la duplicación es debido a que diariamente es cortada una espinaca, por lo que se prevee algún error en el corte, es decir, si existe un mal corte de la planta podemos cortar otra el mismo día.

Esta medida destructiva del peso seco del cultivo, es muy laboriosa y reduce el ingreso económico del producto del cultivo. A este tipo de medición del peso de la materia seca se le conoce como "Medida Destructiva", ya que se están utilizando plantas diariamente, los cuales podrían ser bien aprovechados para los consumidores.

De lo anterior, se propone en este tema de tesis una manera indirecta "NO DESTRUCTIVA", para la observación del crecimiento y de esta forma saber también el estado del cultivo, el método aquí propuesto es por medio del "PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES".

1.2 Antecedentes

Durante la última década se han aplicado métodos no destructivos en agronomía para obtener datos sobre el crecimiento y desarrollo de un cultivo exitosamente. A continuación se mencionarán algunos reportes relevantes en esta área de la agronomía.

Hiromi Eguchi[3]. Desarrolló un sistema de adquisición de imágenes del pepino cultivado dentro de un invernadero de vidrio, así que las imágenes tomadas con una video cámara contienen un fondo de algunos tipos de iluminación de las superficies reflejadas, al ser analizadas las imágenes se consideraron como matrices, en donde los elementos de la matriz representan

niveles de gris del porcentaje de reflexión de luz y son desplegados como un símbolo digital, Por lo que este trabajo describe técnicas de procesamiento digital para seleccionar la imagen de la planta sobre la base de las características espectrales de la luz reflejada. Se trabajo dentro de dos bandas de onda la roja (R) y la infrarroja estas hicieron posible una clara separación del fondo y la planta.

E.J. Van Henten[5] desarrolló un método no destructivo para medir el crecimiento del cultivo de la lechuga. En este trabajo se realizaron las dos formas de analizar el crecimiento de un cultivo, es decir,

1. El método destructivo, el cual consiste en cortar y quemar el vegetal, y
2. El método no destructivo, el cual consiste en monitorear el vegetal por medio de una cámara digital. Se describen 3 modelos los cuales dan la relación entre la cobertura de suelo relativa por el dosel de cultivo y el peso seco.

El error obtenido al obtener el peso seco es de aproximadamente el 5%. Se tuvieron problemas al querer analizar la imagen, el cual consistía en la separación del fondo y el vegetal, la forma en que se soluciono este problema fue colocando una película negra sobre la tierra donde fue plantada la lechuga, ya realizada la separación del objeto y fondo, se realizó un conteo de píxeles que tuviesen el mismo valor de gris. Y de esta forma se obtuvo el peso de materia seca. En este artículo no se da la explicación de como se obtiene el peso de la materia seca de las imágenes.

G.R. Hack[6] realizó un estudio de la lechuga en condiciones de sobre línea, durante 48 días, utilizó técnicas de procesamiento digital de imágenes para lo cual desarrolló un sistema de adquisición de imágenes con una cámara infrarroja (750 - 1100nm). Esto fue con el objetivo de separar el objeto del fondo y de esta forma analizar fácilmente el crecimiento de la lechuga, no se hace mención de como se realizó el conteo de píxeles que contiene la lechuga, muestra que el procesamiento digital de imágenes puede ser usado para el control en línea del crecimiento de la planta bajo ciertas condiciones: 1) Los niveles de gris deberán ser adaptados a la intensidad de radiación solar, 2) el intervalo de tiempo entre las medidas tiene que ser seleccionado de acuerdo a la velocidad de crecimiento de la lechuga.

1.3 Objetivos

El objetivo de esta tesis es el seguimiento del crecimiento de la espinaca mediante Técnicas de Procesamiento de Imágenes. Para poder alcanzar lo anterior, se tiene que realizar lo siguiente:

1. Armar un sistema de adquisición de imágenes de bajo costo para las espinacas.
2. Desarrollar un programa con el cual se obtiene el área de hoja.
3. Desarrollar un modelo de crecimiento para la espinaca correlacionado con la información del sistema de adquisición de imágenes, es decir, una vez obtenidos los datos del área de hoja promedio dados por la observación del cultivo, se obtiene la modelación del proceso de crecimiento por medio de una función, la cual representa el área de planta desarrollada en dependencia del tiempo.

1.4 Propuesta del Trabajo de Tesis

Este trabajo de tesis propone la realización de un método no destructivo para observar el crecimiento de las plantas, consta del estudio de imágenes digitales, basado en las técnicas utilizadas en el procesamiento digital de imágenes, con él podemos obtener el área foliar de cada planta por día, y con ellas obtener una curva de característica que determine el comportamiento por día de la planta durante todo el período de crecimiento.

Se realiza el monitoreo del cultivo por medio de una cámara digital conectada a una computadora personal, la cámara es colocada de tal forma que tenga un ángulo y distancia ...ja con respecto al cultivo. Las fotogr...as tomadas durante el período de crecimiento se almacenarán en un archivo, las imágenes son estudiadas bajo la Plataforma DIAS bajo la cual se ejecuta un programa que obtiene el área de cada planta sin ser cortada.

La planta que aquí se propone en sembrar es la espinaca, dado que el período de crecimiento es corto y no necesita un terreno grande para su crecimiento, además juega un papel importante en el consumo de alimentos en nuestro país.

1.5 Planteamiento del Problema

Se propone trabajar sobre una escena física, espinacas plantadas en tierra dentro de macetas, vistas desde arriba por medio de una cámara. Estas son observadas durante dos meses, el cual es el período de crecimiento de la espinaca. De aquí se requiere determinar el área de hoja alcanzada por las plantas cada día.

Bajo "área de hoja" de una planta entendemos la suma de áreas de hojas de la planta, las cuales son observables en el plano de imagen tomada desde una cámara localizada en la parte superior del cultivo, ver Fig 1.3.

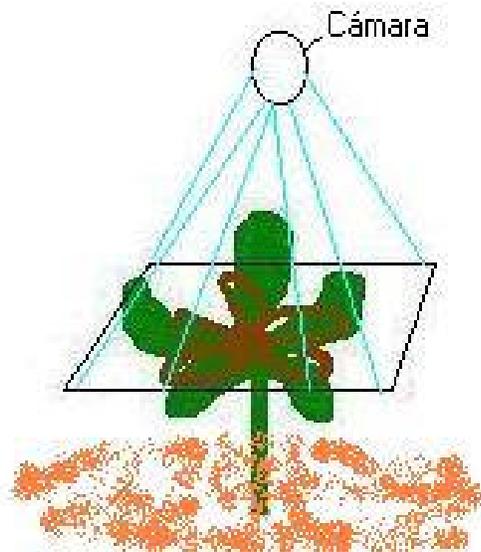


Fig. 1.3 La parte verde es la espinaca desde una perspectiva humana, en donde vemos a una planta en 3D, la parte café es como se observa con una cámara en una posición vertical (arriba de la escena), la planta es vista en un plano.

Así que el área de hoja comprende el total de áreas de la proyección perpendicular de la planta en un plano horizontal.

Se tomaron fotografías de la escena diariamente durante el proceso de crecimiento de las plantas. Para analizar las imágenes, se propuso el siguiente esquema de procesamiento digital dado en la Fig. 1.4.

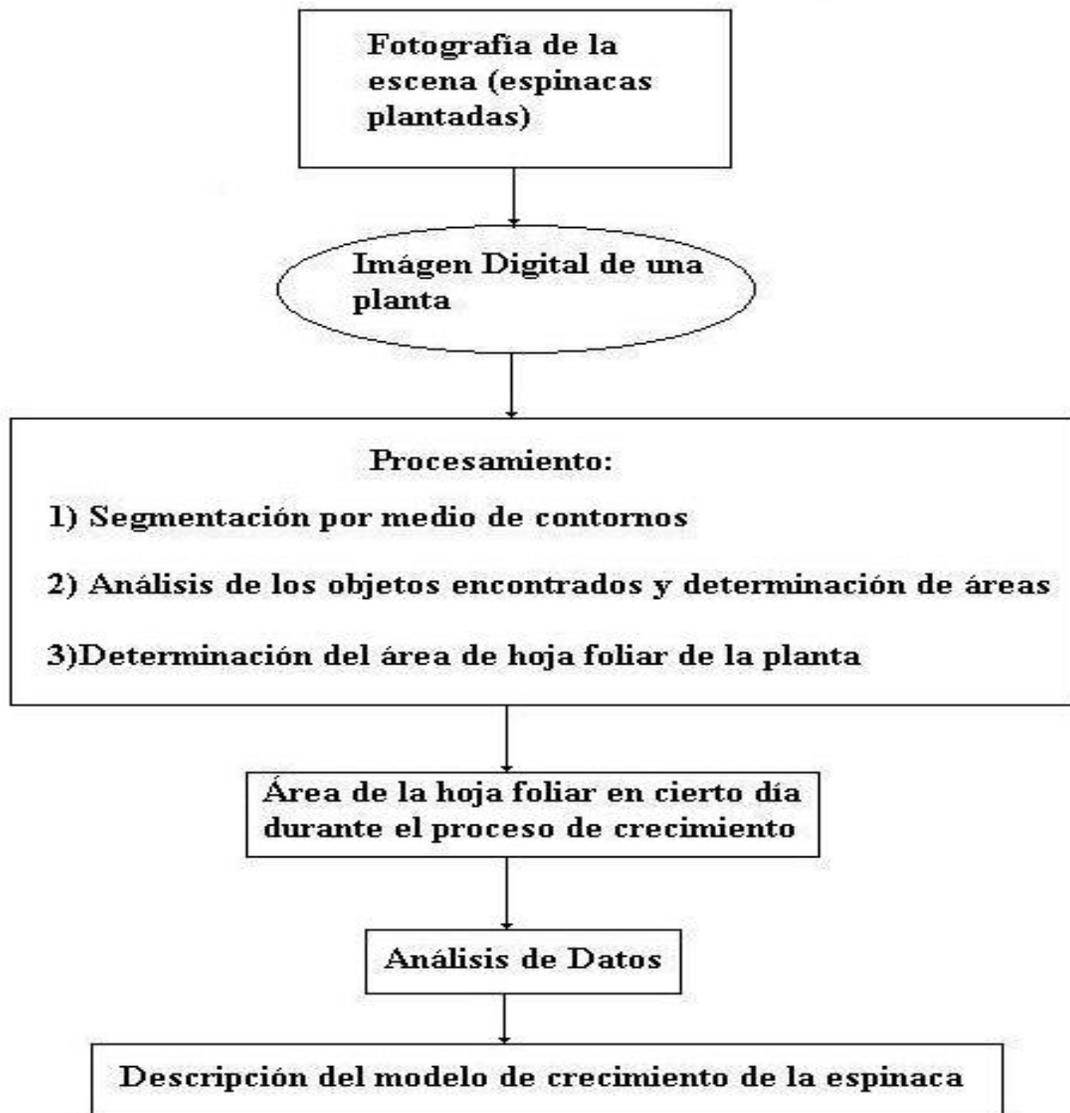


Fig. 1.4 Diagrama de Flujo

1.6 Estructura de la Tesis

El presente reporte esta organizado de la siguiente manera:

El capítulo 2 describe las condiciones climatológicas para un buen crecimiento y desarrollo de la espinaca. El capítulo 3 presenta la adquisición de imágenes digitales y se da una breve

descripción de las funciones utilizadas para el desarrollo del programa que determina el área de hoja foliar de cada espinaca. El capítulo 4 describe el desarrollo del programa, además, da la comparación entre el método empírico y el método de procesamiento digital de imágenes aquí propuesto y los resultados del crecimiento de la espinaca mediante gráficas. Finalmente, se dan las conclusiones y perspectivas, se resumen ventajas y desventajas del método aquí utilizado para obtener el área de hoja foliar de cada espinaca, también se dan algunas sugerencias para obtener una mejor imagen y por último se dan las perspectivas a futuro.

Capítulo 2

CARACTERÍSTICAS Y CRECIMIENTO DE LA ESPINACA

Se realiza una descripción de las características taxonómicas y climatológicas de la hortaliza Espinaca.

En una tabla se dan las temperaturas a las que puede ser expuesta la cosecha y en base al grado de temperatura se dan los tiempos de germinación y emergencia.

2.1 Crecimiento de la espinaca.

La espinaca pertenece a las quenopodiáceas. Es una hortaliza, la cual tiene un alto contenido en proteínas y poca cantidad de grasa, contiene minerales y de 85% a 94% de agua. La clasificación de las Hortalizas es de acuerdo a la época de explotación o producción.

La espinaca se clasifica dentro de las plantas anuales cuyo ciclo vital se inicia y concluye en un mismo año, y en un mismo período que generalmente dura de 2 a 6 meses.

Durante una segunda temporada, bajo condiciones ambientales determinadas como bajas temperaturas (vernalización) principalmente, se presenta la fase reproductiva, que termina con la producción de semilla, senescencia y muerte de la planta.

Las familias que siguen este proceso son las amarilidáceas, quenopodiáceas, umbelíferas,

liliáceas, crucíferas, etc.

2.2 Características de la Espinaca

En México, dentro de la familia de las quenopodiáceas es la que tiene mayor importancia económica dado que es muy rica en vitamina A y ácido ascórbico.

Según Weaver y Bruner (1927) la raíz principal puede medir hasta 1.8m y 30cm de ancho, por lo que respecta al tallo, éste es muy corto y rudimentario llegando a medir de 0.5 a 1.0 cm, sin embargo Guenko (1983) menciona que el tallo total es cilíndrico y llega a medir de 60 a 80cm de altura.

Las hojas son lisas, acorazonadas y de color verde, crecen en forma de roseta o ramillete, las flores se dan en racimo, en un número promedio de 6 a 20 hojas, hay tres clases de flores estaminadas, pistiladas y hermafroditas, estas últimas son muy raras.

Taxonomía de la espinaca.

Familia: Quenopodiacea

Género: Spinacia

Especie: Oleracea

Nombre Común: Espinaca

2.3 Requerimientos de Clima

La espinaca es una hortaliza de clima templado y puede tolerar heladas. El rango de temperatura para su germinación es de 10° a 15°C y puede llegar a emerger a los 8-12 días (aparición de la plántula sobre la superficie del suelo).

Según el grado de temperatura es el porcentaje de germinación (reanudación del crecimiento)

de un embrión ó espora), como se observa en la Tabla 1.

Temperatura ±C	% Germinación	Días de Emergencia
0	83	63
5	96	23
10	91	12
15	82	7
20	52	6
25	30	5
30	30	6
35	0	0

Se ha observado que la temperatura adecuada es entre los 16± a 18±C; viendo esto en la tabla es entre los 15± y 20±C. Los agricultores afirman que en condiciones de fotoperíodo largo mayor a 12 horas y altas temperaturas mayores a 26±C, se emite el vástago floral y con un fotoperíodo corto se mantiene vegetativamente, esta última es la forma en la que se mantiene a la espinaca para ser un vegetal comestible para el humano.

Con estos datos se sembraron las semillas de la espinaca tipo: Espinaca Viroñay Normal, las cuales estuvieron expuestas a una temperatura entre 15± y 20±C; para obtener respuestas a cordes a la Tabla 1, a esta temperatura el porcentaje de germinación es de 82 a 52%y los días de emergencia son de 7 y 6 días, los resultados prácticos fueron positivos dado que se tuvo la germinación del 82% y la emergencia fue en 5 días.

Capítulo 3

ADQUISICIÓN Y PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES DE LA ESPINACA

Este capítulo trata de las características de la computadora que se utilizó para realizar el programa y para el almacenamiento de las fotografías tomadas a la planta durante todo el período de crecimiento de la planta. Además se hace una descripción de la cámara fotográfica digital utilizada considerando los siguientes aspectos: la distancia a la que quedó la cámara, la conversión de píxeles a centímetros. Es decir, la calibración de la cámara, este es uno de los datos más relevantes en este capítulo dado que el principal tema a desarrollar es obtener el área de la planta y de una hoja la cual es dada en centímetros cuadrados, se dan aspectos a considerar para la instalación correcta de la aplicación llamada DIAS, en la cual se desarrolló el programa que Determina el Área Foliar de la Espinaca se dan algunos conceptos básicos utilizados en procesamiento digital de las imágenes. Finalmente se dan definiciones de los conceptos técnicos utilizados en el programa DIAS para la obtención del área de las espinacas.

3.1 Equipo de Adquisición de Imágenes

El equipo utilizado para la elaboración de este tema de tesis fue el siguiente:

1. PC procesador Pentium III a 133MHz, con 1GB en memoria
2. Cámara Digital (Web Cam), conectada al puerto USB de la PC y tarjeta digitalizadora integrada en la PC, para convertir la imagen tomada de la cámara en una imagen digital en formato JPG a color.
3. Microsoft Windows 98, sobre el cual se instaló el paquete de software DIAS.
4. Adaptador de visualización que tenga soporte para color de 32 bits con una resolución de 640x480 píxeles.

La Video Blaster WebCam 3 es un equipo de videocámara digital de 16.7 millones de colores y 24 bits, da una captura de video en vivo de hasta 30 cuadros por segundo a una resolución de 352x288 píxeles, y hasta 15 cuadros por segundo a 640x480 píxeles.

DIAS, de las siglas Digital Image Analysis System, es un paquete de software que se instala bajo el sistema operativo WINDOWS en una PC (también existe una versión para LINUX). DIAS es principalmente un conjunto de procedimientos programados (tanto en lenguaje C como en Ensamblador) que realiza algoritmos para el análisis de imágenes digitales, desde la captación, generación y procesamiento (filtrado) de imágenes digitales, hasta métodos de segmentación de análisis y de reconocimiento de objetos y análisis de datos.

Los orígenes del DIAS fueron a finales de los 70's desarrollado por un grupo de investigadores bajo la dirección del Dr. Klaus Voss, dedicándose al Procesamiento Digital de Imágenes Médicas en el Hospital Charité de Berlín, capital de la República Democrática Alemana. El programa DIAS actual fue desarrollado por un grupo que trabaja en Visión Artificial, bajo la dirección del mismo Prof. Dr. Voss, en la Facultad de Matemática e Informática de la Universidad Friedrich Schiller en Jena, Alemania.

3.2 Toma de Imágenes

Se consideraron las siguientes precauciones para obtener una imagen con una nitidez y brillantez adecuada a cada planta y, de esta forma, destacar todos sus detalles.

1. Se mantuvo fija la cámara todo el tiempo, a una distancia de 65cm y un ángulo de 90°; con respecto a las macetas.

2. Se mantuvo la cámara en un lugar que no fuese humedo, dado a que la cámara que se utilizó es para condiciones de ambiente seco y el ambiente al que son mantenidas las espinacas es humedo por lo que se mantuvo a la cámara fuera de las macetas. Se cultivaron 12 espinacas en 2 macetas, 6 en cada una. El crecimiento de la espinaca es por un período de 2 meses mínimo, por lo que, se tomaron fotografías diariamente después de haber emergido la semilla.
3. Se colocaron marcas a las macetas, con el fin de no perder el ángulo y posición de estas.
4. Se etiquetaron tanto las macetas como cada planta de espinaca de las macetas para ser reconocidas diariamente al ser fotografiadas. Por ejemplo, a una maceta se le llamo maceta B y a otra maceta C, la primera planta de la maceta B se le llamo H1B, y la primera planta de la maceta C se llamo H1C.
5. Se utilizó una lámpara incandescente de 100W en combinación de luz solar, esto es debido a que dentro del laboratorio la iluminación era insuficiente para las espinacas.
6. La toma de las imágenes se realizaron por las mañanas aproximadamente entre 9 y 10 de la mañana, sólo se tomó una fotografía por día de cada planta.

Al ser considerados estos puntos se prosiguió a tomar las fotografías de cada espinaca. (Ver Fig 3.1).

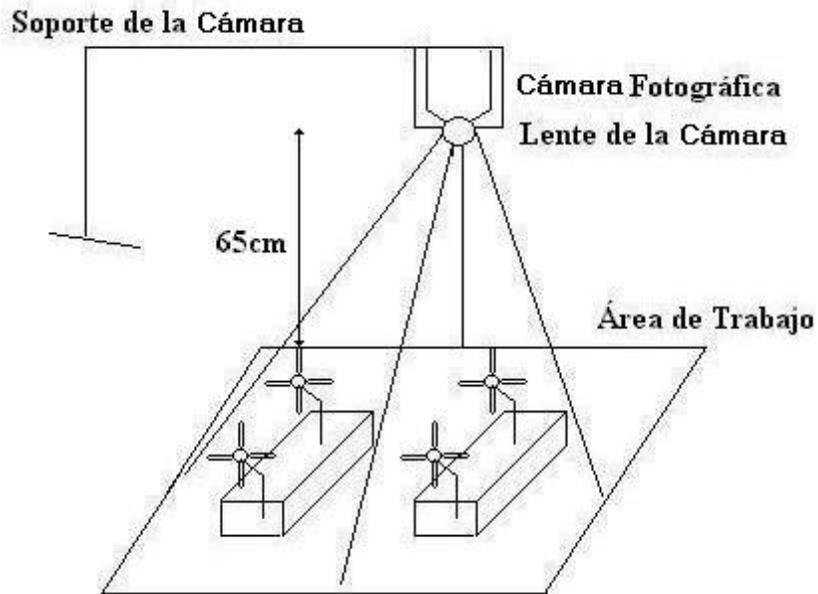


Fig. 3.1 Área de Trabajo

Los primeros días se obtuvieron imágenes con una resolución de 160 \times 120 píxeles, esto es debido a que en los primeros días de crecimiento la espinaca no era muy visible para la cámara por lo que se tuvo que realizar un acercamiento a la planta, después de unas semanas la planta tuvo un crecimiento mejorable en cuanto a tamaño de ancho y largo, por lo que se modificó la resolución a 320 \times 240 píxeles, para que la planta fuera tomada completamente sin eliminar partes de ella, en los últimos días de crecimiento de la espinaca se modificó la resolución a 640 \times 480 dado a que la espinaca estaba llegando a su crecimiento máximo por lo que su expansión tanto en alto como a los lados fue mucho mayor logrando salir de los límites de la maceta. Se realizaron estos cambios de resolución, debido a que no se quiso modificar la distancia y el ángulo de la cámara.

Este cambio de resolución provocó la búsqueda de un factor que normalizara a las tres series de fotografías con diferente resolución, este factor es mostrado en la siguiente sección.

Las imágenes fueron tomadas a color en el modelo RGB (RED - GREEN - BLUE, ROJO - VERDE - AZUL).

3.3 Calibración, Conversión de Píxeles a Centímetros Cuadrados

La conversión de píxeles a centímetros cuadrados, se hizo de la siguiente manera:

Se dejó la cámara, en la misma posición que se utilizó, para tomar las fotografías a las espinacas, como se observa en la Fig. 3.1. Con la diferencia de que, en lugar de las espinacas se colocó papel cartulina de color blanco, y sobre está, un cuadrado de color negro con una longitud de 2:5cm de cada lado.

A este cuadrado se le tomaron fotografías con las tres diferentes resoluciones utilizadas; 160 E 120, 320 E 240, 640 E 480 píxeles, para la toma de fotografías de las espinacas.

Las tres fotografías fueron analizadas para obtener el número de píxeles que contiene cada cuadro, en sus tres diferentes resoluciones.

Para saber cuantos píxeles tiene el cuadro, se realizó un programa, bajo la plataforma DIAS, en este programa, se realiza el conteo de píxeles que hay dentro del contorno del cuadro. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 1.1:

Resolución	Área en centímetro	Área en pixeles
160 E 120 píxeles	6:5cm ²	868
320 E 240 píxeles	6:5cm ²	812
640 E 480 píxeles	6:5cm ²	169

(Tabla 1.1)

Para saber a cuanto equivalen los píxeles en centímetros cuadrados, supongase que una fotografía fue tomada con una resolución de 160 E 120 píxeles, de una espinaca, y el área en píxeles de esta espinaca (el número de píxeles dentro del contorno de la planta), sea de 1600 píxeles, como se sabe que un cuadro de 6:5cm² tiene un área de 868 píxeles, entonces el área en por cm² de la espinaca, se obtiene por la ecuación:

$$\text{Área en cm}^2 \text{ de la Espinaca} = \frac{\text{Área en píxeles de la Espinaca} \times \text{Área en cm}^2 \text{ del cuadrado}}{\text{Área en píxeles del cuadrado}} \quad (3.1)$$

es decir, en el ejemplo mencionado obtenemos:

$$x = \frac{1600 \text{ € } 6:5\text{cm}^2}{868}$$

Así que el área de la espinaca es entonces de 11:52cm²:

Se puede convertir el área en píxeles de todas las plantas a centímetros cuadrados aplicando la ecuación 3.1.

Como referencia se tomo la resolución de 640 € 480 píxeles, ya que las especi...caciones de la cámara, es que las fotos son tomadas a esta resolución y se pueden realizar acercamientos o alejamientos de 320 € 240 píxeles y de 160 € 120 píxeles.

Se encontraron los siguientes factores de escalamiento; para un zoom de 320 € 240 píxeles el factor de escalamiento es de 4:81 y para un zoom de 160 € 120 píxeles se encontro un factor de escalamiento de 5:14. El último resultado obtenido por la ecuación 3.1 se debe dividir por el factor correspondiente a la resolución utilizada. Por lo que, el área de la espinaca que se consideró en el ejemplo anterior es de 2:241cm²:

3.4 Procesamiento Digital de Imágenes

Una imagen analógica monocromática es una señal cuyo valor depende de una, dos o más variables, y es modelada como una función f_a con n variables reales y con valor real, $f_a : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$. Para que una imagen f_a pueda ser procesada por una computadora, se discretiza su dominio de definición y se cuantifica su dominio de valores, para obtener una función f definida sobre un subconjunto rectangular de \mathbb{Z}^n ; es decir, de puntos de \mathbb{R}^n con coordenadas enteras, y con valores enteros, $f : \mathbb{Z}^n \rightarrow \mathbb{Z}$. La función f es llamada imagen digital monocromática.

En esta tesis consideramos solamente el caso $n = 2$, entonces tenemos $f(x;y) \in \mathbb{Z}$; para $x;y \in \mathbb{Z}$ y $(x;y)$ dentro un rectángulo en \mathbb{R}^2 ; los puntos $(x;y)$ se llaman píxeles (picture elements), los valores $f(x;y)$ se denominan valores de gris o niveles de gris. Esta función entonces es representada por una matriz $(f_{i;j})_{\substack{i=1..k \\ j=1..l}}$ (llamada matriz de imagen), donde $f_{i;j} = f(x;y)$; siempre y cuando supongamos un sistema de coordenadas como en la Fig. 3.2 cuyo punto de origen es la esquina izquierda superior del rectángulo a partir del cual $f(x;y)$ es

de...nida.



Fig. 3.2. Imagen monocromática

Cabe mencionar que estas matrices pueden ser grandes, una imagen digital común es por ejemplo de 1024×1024 píxeles. Sin embargo, debido al desarrollo acelerado de equipos de computo durante los últimos años, el trabajo con imágenes digitales de varias variables o con imágenes digitales de...nidas más ampliamente como funciones $f : Z^n \rightarrow Z^m$ es común. En el caso $n = 2$ y $m = 3$ tenemos una imagen digital de dimensión 2 a color, entonces el valor $f(x; y)$ es un vector con tres coordenadas, los cuales representan la brillantez o valor de gris en cada uno de tres canales en el modelo de color RGB: R (red = rojo), G (green = verde), B (blue = azul), por esto esta imagen a color $f(x; y)$ es la composición de tres imágenes monocromáticas $f_1(x; y); f_2(x; y); f_3(x; y)$; de tal manera que $f(x; y) = (f_1(x; y); f_2(x; y); f_3(x; y)) \in Z^3$: Ver Fig.

3.3.

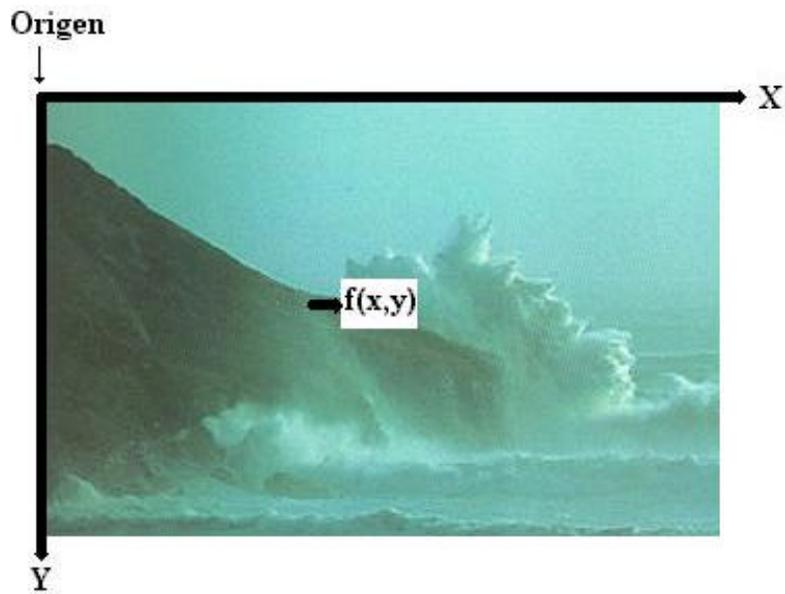


Fig. 3.3 Imagen a Color

El Procesamiento Digital de Imágenes comprende, en un sentido restringido, todos los métodos que transforman una imagen digital en otra imagen digital "mejorada", donde una tarea específica determina los criterios de mejoramiento. Eso incluye por ejemplo el simple aumento de la nitidez o una eliminación de cierto ruido hasta la reconstrucción de obras antiguas de pintura. Sin embargo, en un sentido amplio, el término de Procesamiento Digital de Imágenes, es usado como sinónimo del término de la Visión por Computadora y a la Visión Artificial y entonces se refiere a la totalidad de métodos que sirven para adquirir, generar, transformar, analizar e interpretar imágenes digitales, y también a aspectos técnicos, computacionales y teóricos para desarrollar y realizar dichos métodos.

En el caso de imágenes a color, su procesamiento, por lo general, se realiza en cada canal de color por separado, es decir, si $f = (f_1; f_2; f_3)$, entonces, se procesa cada imagen (monocromática) $f_1; f_2; f_3$ (donde posiblemente a cada imagen se le aplica un método de procesamiento diferente), y después se tiene que combinar las tres imágenes resultantes para sintetizar una imagen a color.

Con las técnicas del procesamiento digital de imágenes se han automatizado procesos en la medicina, la biología, la robótica y la agronomía entre otras; a esta última área es enfocada la presente tesis .

El análisis de las imágenes digitales es usado para determinar ciertas características o rasgos de una imagen, por ejemplo: en la agronomía ayuda a determinar el crecimiento de la planta para obtener el peso de la materia seca, en el área de ecología se estudia la competencia por el espacio en cuanto a crecimiento de las plantas, en la medicina se utiliza para el cálculo de tomografías ó imágenes de resonancia magnética, en la industria es utilizado, por ejemplo, para el análisis de calidad o como base para el control y manejo de un robot.

3.5 Procesamiento Digital de Imágenes de las Espinacas.

La forma de llevar esta sección es en base a los pasos utilizados en en el programa para la “Detección del Área Foliar de la Espinaca Mediante el Procesamiento Digital de Imágenes”. Es importante mencionar que los algoritmos de las de...niciones que se darán a continuación ya son procesados por el programa DIAS. Con esta sección se pretende dar breve explicación del funcionamiento de los términos utilizados en el programa para detectar las áreas de las espinacas.

Al procesar una imagen digital; primeramente se le invirtieron los niveles de gris a cada imagen, es decir, se tomó el nivel de gris máximo menos el nivel de gris en cada punto, este resultado es el nuevo valor de gris de la imagen, esto es debido a que al invertir los niveles de gris de la imagen resalta más el objeto que el fondo. Posteriormente se obtiene el histograma de la imagen.

Un histograma de una imagen digital es una función discreta, que asigna a cada nivel de gris el número de píxeles de la imagen que tiene este nivel de gris. En la ...g. 3.4 se muestra un

histograma de una imagen digital de la espinaca:



Fig. 3.4 Histograma de una Imagen de Espinaca

Es bien conocido que los mínimos locales del histograma pueden servir para segmentar una imagen. Si el histograma de una imagen tiene un solo mínimo local bien acentuado en T (donde T no está cerca de los valores de gris tanto mínimo como máximo disponible), entonces, en muchos tipos de imágenes, el conjunto de píxeles con un valor de gris menor de T corresponde al fondo de la imagen, y el conjunto de píxeles con un valor de gris mayor de T corresponde al conjunto de los objetos de interés, o viceversa.

Por eso, la transformación aplicada a la imagen $f(x; y)$ de...nida por:

$$g(x; y) = \begin{cases} F_1; f(x; y) \geq T \\ F_2; f(x; y) < T \end{cases} ; \quad (3.2)$$

donde $F_1; F_2$ son dos valores de gris diferentes disponibles produce una imagen $g(x; y)$ en la cual los objetos son claramente segmentados del fondo de la imagen. De hecho, el dominio de de...nición de $g(x; y)$ es el conjunto $F_1; F_2$ (donde comunmente se escoje $F_1 = 1 = \text{negro}$ y $F_2 = 0 = \text{blanco}$) por lo cual $g(x; y)$ se llama imagen binaria.

La transformación 3.4 se llama umbralización o binarización con el umbral (T). En forma parecida, si el histograma de una imagen $f(x; y)$ tiene k mínimos locales bien acentuados, entonces, en muchas aplicaciones, estos valores de gris $T_1; T_2; \dots; T_k$; sirven como umbrales de

segmentación en una transformación dada por:

$$g(x;y) = \begin{cases} F_1; f(x;y) < T_1 \\ F_2; T_2 \cdot f(x;y) < T_1 \\ \vdots \\ F_k; T_k \cdot f(x;y) < T_{k-1} \\ F_{k+1}; f(x;y) < T_k \end{cases} \quad (3.3)$$

Suponiendo que el valor mínimo disponible $0 < T_k < T_{k-1} < \dots < T_2 < T_1 < \text{valor máximo disponible de gris}$ donde $F_1; F_2; \dots; F_{k+1}$ son valores de gris diferentes, cada uno de los cuales representa una cierta clase de objetos o de partes de la imagen original. La última transformación se llama umbralización multivaluada. Por ejemplo, la Fig. 3.5 muestra un histograma en el cual se tienen 2 mínimos locales T_1 y T_2 , que pueden servir como umbrales de segmentación.

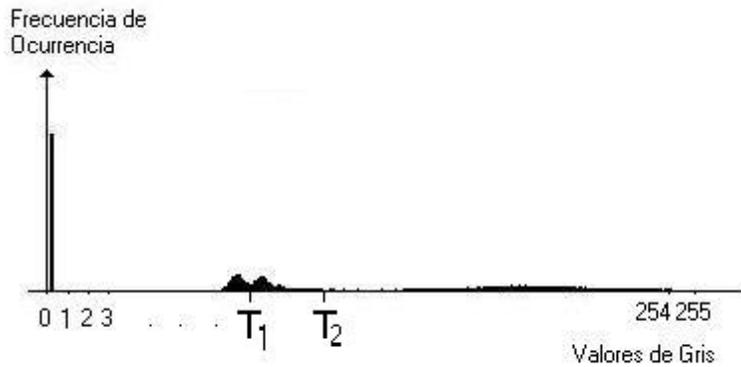


Fig. 3.5 Histograma con 2 mínimos locales T_1 y T_2

En el programa de la determinación del área foliar de la espinaca aplicamos la binarización según (3.4), donde se calcula el umbral T aplicando un procedimiento del paquete DIAS, el cual realiza el método propuesto por N.Otsu[7] : Si $f_1; f_2; \dots; f_M$ es el conjunto de los valores de gris disponibles (en nuestro caso $M = 256$), y n_i denota el valor de la función de histograma del valor de gris i , entonces el número total de píxeles es

$$(N = n_1 + n_2 + \dots + n_M)$$

Otsu considera la función normalizada p del histograma en la cual cada valor

$$p_i = \frac{n_i}{N} p$$

es una función de distribución de probabilidad, pues $p_i \geq 0$ $\sum_{i=1}^M p_i = 1$; $i = 1; \dots; M$; y:

$$\sum_{i=1}^M p_i = 1$$

Basado en un análisis estadístico, Otsu deduce que el mejor umbral T es el valor de gris que minimiza la función:

$$s(i) = \frac{\sum_{j=1}^{i-1} p_j \bar{A}_j + \sum_{j=i}^M p_j A_j}{\sum_{j=1}^{i-1} p_j + \sum_{j=i}^M p_j}; \quad i = 1; 2; \dots; M$$

La Fig. 3.6. muestra un ejemplo típico del resultado de binarización de las imágenes de espinacas:



Fig. 3.6 Imagen Binarizada

Dilatación y Erosión

La dilatación y erosión son operaciones que se aplican a subconjuntos de Z^2 , y se definen en base a las operaciones del cálculo del anillo Z^2 y operaciones y relaciones entre conjuntos [8]. Si estos subconjuntos representan los objetos de interés en una imagen digital binaria de dimensión dos, entonces se pueden aplicar las siguientes operaciones a estas imágenes, con el

objetivo de realizar cierto mejoramiento.

Definición 1 Sean A, B subconjuntos de $Z^2 = \{(x, y) : x, y \in Z\}$ entonces se define:

$$(A)_x = \{a + x : a \in A\}; \text{ para } x \in Z^2 \text{ (Traslación de } A \text{ por } x)$$

$$\hat{B} = \{x_j : x_j = i, b; \text{ para } b \in B; \text{ para } x \in Z^2 \text{ (Reflexión de } B)$$

$$A \odot B = \bigcap_{x \in Z^2} (A)_x \cap \hat{B}_x; \text{ (Dilatación de } A \text{ por } B)$$

$$A \ominus B = \{x : (B)_x \subseteq A\}; \text{ (Erosión de } A \text{ por } B)$$

Se aplicaron la dilatación y erosión a nuestras imágenes binarias donde A es el conjunto de píxeles de interés (espinaca), estos píxeles tienen el valor 1, mientras que todos los otros píxeles de la imagen tienen valor 0:

Dilatamos y erosionamos el conjunto A por B_x donde B_x es la 8-vecindad (o 4-vecindad) del píxel x : En este caso, las formulas se simplifican considerablemente, entonces:

$$A \odot B = \bigcap_{p \in Z^2} \{p \in A : N_8(p) \subseteq A\}$$

$$A \ominus B = \bigcap_{p \in A} \{p \in A : N_8(p) \subseteq A\}$$

El efecto de la dilatación es una expansión del objeto, en cambio la erosión causa una compresión del mismo, ver Figs. 3.7 y 3.8.

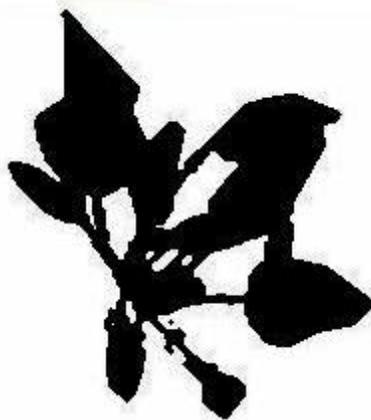


Fig. 3.7 Imagen Dilatada

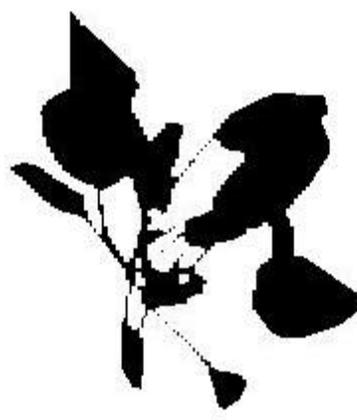


Fig. 3.8 Imagen Erosionada

Contorno de un Objeto dentro de una imagen: es la frontera de este objeto. Si el objeto es

representado como un subconjunto 4-conexo de píxeles, entonces su contorno es un conjunto de los píxeles de objeto que tienen al menos un 8-conexo vecino fuera del objeto.

Seguimiento de Contorno: este método inicia con la búsqueda de un punto inicial de contorno, barriendo la imagen línea por línea de la izquierda a la derecha. Este punto inicial se distingue de los demás píxeles de la imagen por cierto valor de gris (sobrepasando un umbral predeterminado) y el hecho que en su cercanía se encuentran más píxeles parecidos a él. Una vez encontrado un punto inicial, los algoritmos de seguimiento de contornos siguen el contorno del objeto, analizando en cada punto encontrado su vecindad dentro de la cual se busca el siguiente punto que satisface la definición de contorno. Al haber encontrado un nuevo punto de contorno, se tiene que verificar un criterio de finalización del algoritmo, el cual se satisface cuando el contorno fue cerrado correctamente. El algoritmo aplicado en nuestro programa por procedimientos del paquete DIAS, es un algoritmo del Dr. Klette y Prof. Dr. Voss, el cual determina con alta eficiencia los contornos de objetos 4- u 8-conexo, vea por ejemplo [9].

Código Cadena o Código Freeman: es una representación numérica eficiente (ocupando poca memoria) de una sucesión de píxeles 4- u 8- ó 6-conexo, es decir, de un camino en la correspondiente gráfica vecina. Se enumeran los vecinos de un píxel de la siguiente manera, ver Fig. 3.7.

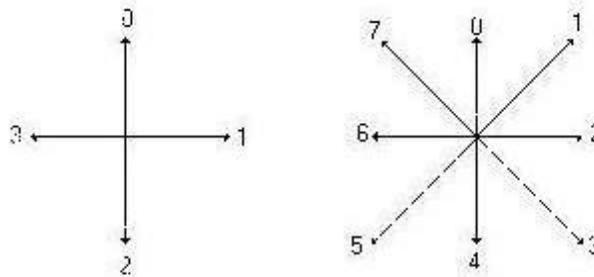


Fig. 3.9 Código Cadena

Ahora, si $S = f(x_1; x_2; x_3; x_4; \dots; g)$ es una sucesión de píxeles, en la cual cada dos puntos seguidos $x_i; x_{i+1}$ son 4-vecinos, entonces se memoriza simplemente el número de la dirección del paso de x_i a x_{i+1} según el esquema de la Fig. 3.9 la sucesión de estos números se llama código cadena. Es obvio, que cuando se memorizan las coordenadas del punto x_1 , la sucesión S es completamente recuperable del código cadena, así, este código ofrece un buen método de

compresión de datos, por ejemplo de contornos.

El código cadena de contornos es además aplicado para analizar estos contornos, por ejemplo con respecto a picos (puntos donde la curvatura del contorno tiene un máximo local).

Capítulo 4

EXPERIMENTOS REALIZADOS

El objetivo de este capítulo es mostrar los resultados prácticos del desarrollo de la tesis para la obtención del área de la espinaca, es presentada una forma manual de obtener tanto el peso como el área de las plantas, y los procesos realizados en el programa para calcular el área de la espinaca en base a imágenes tomadas diariamente, y ...nalmente se realiza un proceso de comparación de resultados obtenidos manualmente y obtenidos con el programa de análisis de la imágenes digitales.

4.1 Determinación Empírica del Peso de la Materia Seca

Una manera empírica y manual para determinar el área y peso de la materia seca es la forma en que la realizan en los laboratorios de la Universidad Autonoma de CHAPINGO, la cual consiste en:

Después de la emergencia, se corta una planta por día al ras del suelo, esta es calcada sobre una hoja de papel, posteriormente se recorta el contorno de la plnata calcada y ...nalmente es pesada en una balanza analítica. Así mismo, la planta es secada en un horno de circulación de aire forzado durante 24 horas a una temperatura entre los 80[±] y 105[±] C; después de este tiempo se sacan los restos de la planta y son enfriados para posteriormente pesarlos y obtener el peso de la materia seca.

Por otro lado, se traza un cuadro que tenga una área conocida, la cual sirve de referencia, también es se recortado y pesado en una balanza analítica para obtener los datos de área

y peso del cuadro (en cada peso se consideraron hasta tres cifras significativas), se hace una comparación entre el peso de la planta, el peso del cuadro y área del cuadro para calcular el área de la planta, utilizando la ecuación 3.1 del capítulo 3, de esta manera destructiva se obtiene una aproximación tanto del área de hoja como del peso seco.

Para seguir estos mismos pasos de obtención de área y peso de una planta de una forma no destructiva se siguieron los pasos que a continuación se enumeran:

1. Se imprime cada imagen por día, consecutivamente se recorta el contorno de la planta quitando lo más posible los restos del fondo de la imagen, este recorte es pesado en una balanza analítica, después,
2. Se traza un cuadro en cada hoja de impresión de las plantas (debido a que el espesor de la hoja de papel tiene variaciones en su espesor que repercute en variaciones de peso. De esta forma nosotros tenemos un peso aproximado para cada espinaca), el cuadro tiene 2:5cm de cada lado y un área de $6:25\text{cm}^2$, este cuadro sirve de referencia para los cálculos posteriores.
3. Se conoce el área A_1 (área del cuadro de referencia) y peso P_1 (peso del cuadro de referencia), y además se conoce el peso P_2 (peso del recorte de la espinaca), por lo que, el área A_2 (es el área desconocida, área de la espinaca), es calculada fácilmente por la ecuación 3.1, $A_2 = (A_1 \times P_2) / P_1$:

Cada paso fue aplicado a las 56 imágenes de la espinaca, así que, los datos obtenidos sirven de referencia para ser comparados con los datos arrojados por el programa de análisis de imágenes digitales, desarrollado en este trabajo de tesis.

4.2 Determinación del Área de Hoja Foliar por medio del Procesamiento Digital de Imágenes.

Se obtuvieron 12 series de fotografías de las espinacas; cada serie contiene 56 imágenes, cada imagen fue tomada diariamente las cuales representan el crecimiento de la espinaca por día. Cada imagen es analizada en un programa computacional desarrollado bajo la plataforma de software DIAS. Este programa ayuda a determinar el área de cada planta. Se decidió trabajar

con imágenes digitales monocromáticas, principalmente porque los niveles de brillantez de cada canal de la imagen, en el modo RGB, son semejantes. (Ver Fig. 4.1, 4.2 y 4.3). En estas ...guras se muestra como cada canal R, G y B tienen casi el mismo comportamiento, por lo que la probabilidad de obtener un buen resultado de segmentación de imágenes sobre la base de una diferenciación entre los tres canales del modo RGB, es sumamente baja.

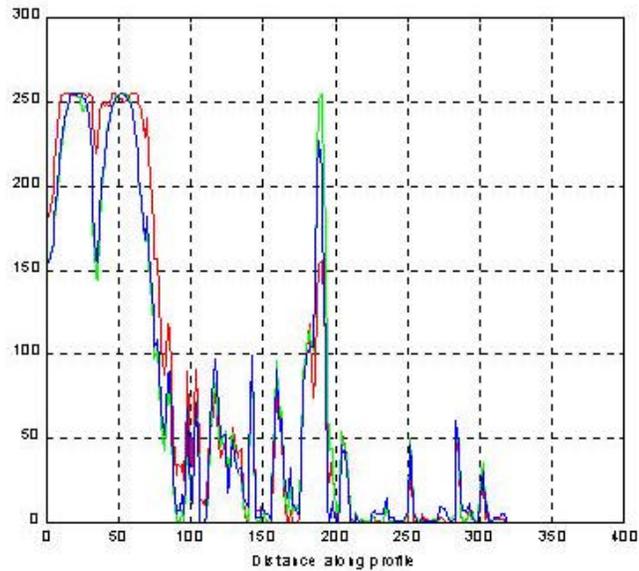


Fig. 4.1 Resultados obtenidos del nivel de brillantez, de la imagen del 7 de Junio.

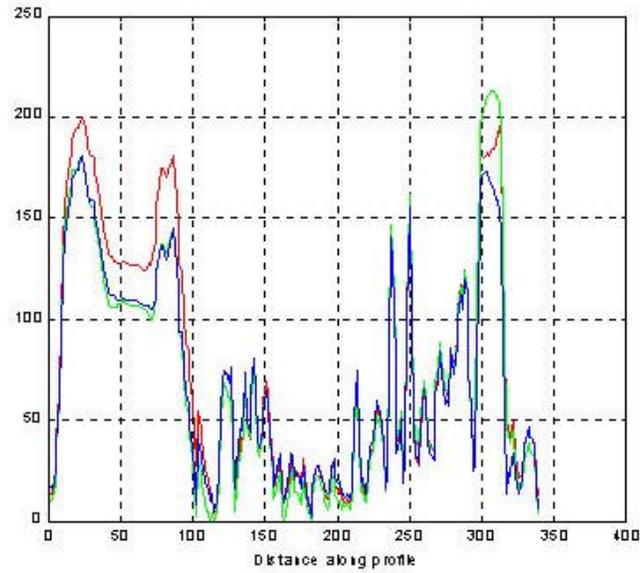


Fig. 4.2 Niveles de brillantez de una imagen del 12 de Julio.

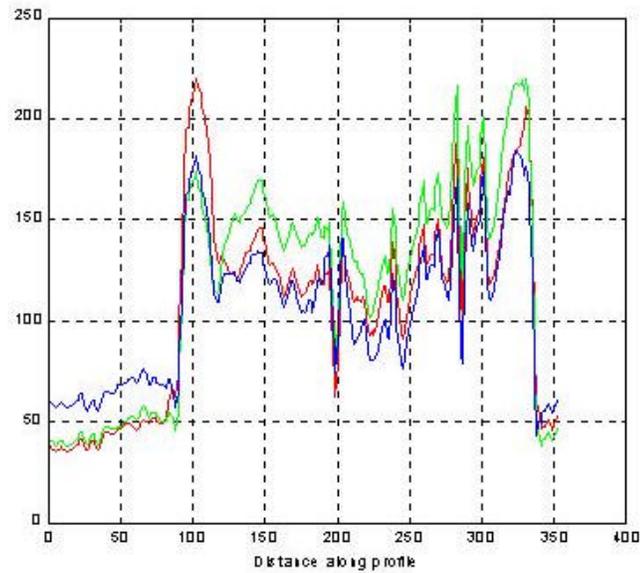


Fig. 4.3 Nivel de brillantez de la imagen 18 de Agosto (...n de período de crecimiento).

4.3 Análisis de Imágenes

Se consideran como ejemplo para la descripción del análisis de imágenes las tres fotografías mostradas en las Figuras 4.4, 4.5 y 4.6, las cuales corresponden a un día después de la emergencia, la mitad del período de desarrollo (30 días después de la emergencia), y ...n del período de desarrollo (56 días después de la emergencia), respectivamente.

El programa para analizar cada imagen de la espinacas desarrollado en este trabajo de tesis es estructurado de la siguiente forma:

1. Discriminación de los Objetos no Deseados
2. Binarización de la Imagen
3. Seguimiento de Contornos
4. Eliminación de Huecos dentro del Contorno
5. Determinación del área de hoja



Fig. 4.4 Imagen del 7 de Junio



Fig. 4.5 Imagen del 12 de Julio



Fig. 4.6 Imagen del 18 de Agosto

Discriminación de Objetos no Deseados

Antes de realizar una discriminación de objetos no deseados, cada imagen se le invirtieron

los niveles de gris con el objetivo de tener un fondo más blanco y un objeto más oscuro, como es mostrado en las ...g. 4.7 y 4.8.



Fig. 4.7 Imagen sin invertir los niveles de gris.



Fig. 4.8 Imagen a la que se le han invertido los niveles de gris

Posteriormente se prosiguió a separar las partes no deseadas de la región de trabajo, la espinaca.

Comparando las Fig. 4.5 y 4.6, se observa que en el lado derecho de la imagen, una parte de la planta se encuentran encima de los bordes de la maceta y además en la parte superior de la imagen, se encuentra una hoja vecina que se traslapa con la imagen por analizar.

Al estudiar los niveles de gris tanto de la maceta como de la hoja traslapada, se observa que son semejantes y en algunos puntos son idénticos; este es un problema difícil de resolver, porque resulta que en algunos puntos de la maceta y de la hoja, los niveles de gris son casi iguales a los de la planta por analizar. Si se quiere eliminar tanto la maceta como las hojas traslapadas de manera automática, hay que tener mucho cuidado de no eliminar partes importantes de la planta que se esté analizando; el quitar partes esenciales de la planta perjudica el trabajo de análisis.

De la literatura se conocen los siguientes métodos para eliminar estas partes indeseables de manera automática:

Segmentación por crecimiento de regiones, basandose solamente en un criterio de similitud de valores de gris: inicializando con un píxel p_0 de cierta región, se marcan los píxeles vecinos no marcados de p_0 siempre y cuando sus valores de gris son muy cercanos al valor de gris de p_0 , luego se realiza el mismo procedimiento con cada uno de los píxeles recién marcados en lugar de p_0 . De esta manera, crece una región de interés, la cual en nuestro caso es por ejemplo la maceta, para que al final se pueda eliminar de la imagen. Sin embargo, por lo dicho anteriormente en el momento de encontrarse con la planta el marcamiento la consideraba como parte de la misma región, por lo que este método no funciona para nuestro caso.

Segmentación por crecimiento de regiones, basado tanto en un criterio de similitud de valores de gris, como también en un criterio de cierta forma geométrica de las regiones: la idea de este método es la misma como en el punto anterior, con la diferencia de que se toma en cuenta un conocimiento a-priori sobre la forma geométrica de la región a marcar. En nuestro caso, las partes de la maceta que deseamos marcar, son principalmente de formas rectangulares muy largas orientadas verticalmente en la imagen. Así que, una idea es

priorizar las direcciones en las cuales se buscan puntos candidatos a ser marcados (para arriba y para abajo). Sin embargo, debido a que la imagen puede contener tallos de planta, orientados verticalmente, este método también es susceptible de fallar.

Debido a estas dificultades de poder aplicar una segmentación automática, se propone en esta tesis un método semi-automático, y de esta forma no se obtienen resultados erróneos.

Este método es el siguiente: para eliminar los bordes de la maceta se crean ventanas ajustables; con estas ventanas se encierran los bordes de la maceta, una vez encerrados se trabaja dentro de esta ventana cambiando los valores de gris al valor de gris más bajo, es decir, cero, así se eliminan las partes de maceta.

Para eliminar hojas que se traslapen de planta a planta, se realiza una marcación del contorno de la hoja que se traslapa de manera manual, esto se realiza mediante la instrucción `CONTSEL`, la cual permite crear y memorizar interactivamente por movimientos del ratón un contorno sobre la imagen; es fácil marcar después el objeto encerrado por este contorno (instrucción `CMARK`), y después borrarlo de la imagen. Tanto las ventanas como la selección de un contorno pueden realizarse cuantas veces sea necesario. Ya descartados los objetos indeseados de la imagen, queda la Fig.4.9.



Fig. 4.9 Eliminación de objetos no deseados

De esta forma se tiene una región de trabajo sin objetos no deseados, que pueden afectar el

análisis de las espinacas para obtener el área de hoja.

Binarización de Imágenes

Antes de binarizar una imagen, se obtiene el histograma de dicha imagen, utilizando las instrucciones GRAYH y VISH, (GRAYH genera un histograma a partir de los valores de gris de una imagen y VISH realiza la visualización del histograma) para generar y visualizar el histograma, con los datos arrojados por el histograma se obtiene el nivel de umbral de la imagen, utilizando la instrucción THRESHOLD, (del histograma obtenido, se calcula un nivel de binarización; la obtención de este umbral es explicado en la sección 3.4), este umbral es usado para binarizar la imagen haciendo uso de la instrucción PBIN, (los valores de gris de una imagen son convertidos por medio del umbral, como es expuesto en la sección 3.4), mostrado en la Fig. 4.10. El valor de umbral es diferente para cada imagen, debido a que se esta aplicando un método de umbralización automático.

Al ser binarizada la imagen, existen partes de la planta que se adelgazan al grado de poderse perder una parte de la planta (por lo general son las ramas), se aplica una operación de dilatación y después una de erosión, para recuperar las partes perdidas de la planta por adelgazamiento, con el objetivo de recuperar aquellas pequeñas partes eliminadas por la binarización.

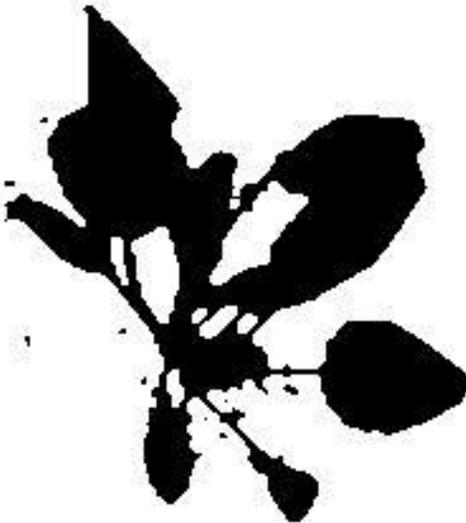


Fig. 4.10 Binarizada

Seguimiento de Contorno

Después de haber binarizado la imagen, se busca el contorno de la espinaca, como fue explicado en la sección 3.4 del capítulo 3, ver Fig. 4.10.

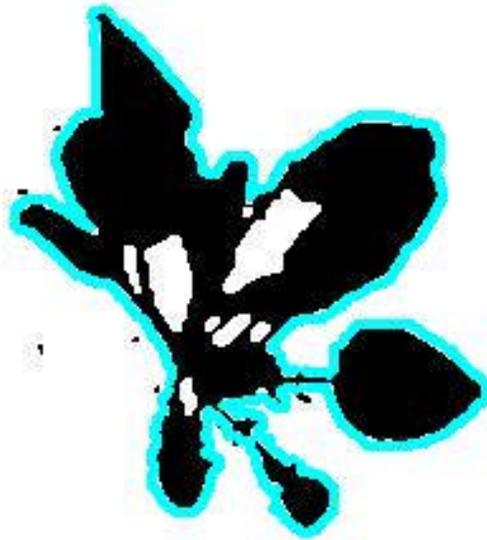


Fig. 4.10 Selección de contorno

Para el seguimiento de contorno se hace uso de la instrucción SEARCH, (esta técnica es explicada en el subcapítulo 3.4), el cual ayuda a localizar puntos que sean consecuencia de un contorno seleccionado, al ser localizados los puntos son marcados de color azul como se contempla en la Fig.4.10.

Al determinar el contorno de la espinaca, se obtiene el área en píxeles de la planta, para esto se realiza un conteo de píxeles que esten dentro del contorno seleccionado, la suma de todos los píxeles es el área en píxel, para esto se utilizo la instrucción CFEATR (Calculan algunos rasgos de un contorno obtenidos por CONTUR(detección de un contorno), como es el área de un contorno y longitud de un contorno).

El área en píxeles es convertido a cm^2 con la ecuación 1 del Capítulo 3. El área tanto en centímetros como en píxeles son almacenados en un registro. Este procedimiento se repite para todas las fotografías que muestran el crecimiento de la espinaca en un período de 2 meses.

4. Eliminación de Huecos dentro del Contorno

Observemos que al marcar el contorno de la planta, quedan partes huecas dentro del contorno seleccionado, por lo que al contar el número de píxeles dentro del contorno, se tienen áreas en píxeles que no son parte de la planta, las cuales son tan solo los huecos que hay entre hojas que se cruzan. En la Fig. 4.11 se señalan como ejemplo las áreas de píxeles que no pertenecen a la planta y sin embargo son consideradas al buscar un contorno.

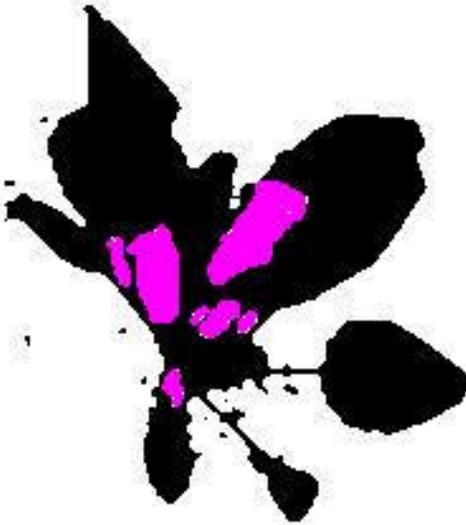


Fig. 4.11 Selección de huecos dentro de un contorno.

Las áreas que están marcadas de color guinda, no pertenecen al área total de la espinaca. La forma de saber a cuanto equivale esta área en píxeles, es seleccionando manualmente los huecos utilizando la instrucción CONTSEL, permite seleccionar contornos con el ratón de la PC para posteriormente ser marcado todo lo que hay dentro del contorno de color guinda de aquí se obtiene el área en píxeles de dichas marcas, esta cantidad de áreas es restada al área en píxeles encontrada sin haber eliminado los huecos, el resultado obtenido es el área real en píxeles de la espinaca y es convertida a cm^2 :

En la siguiente sección se dan las tablas de las áreas tanto en píxeles como en centímetros cuadrados de todas las series de fotografías.

4.4 Tabla de Comparaciones

En las Tablas 4.1, 4.2 y 4.3, se muestran las áreas de hoja foliar obtenidas por el Método Empírico (descrito la sección 4.1) y el Método de Procesamiento Digital de Imágenes (descrito en la sección 4.2).

Cabe notar que los dos métodos proporcionan una aproximación al área real de la espinaca. En la siguiente tabla se dan las fechas en que fueron tomadas las fotografías de la espinaca y las áreas obtenidas por el método tradicional (HP) y por medio del programa que realiza el análisis de las imágenes (HCpP), al igual que es mostrado el porcentaje de error entre el área esperada (HP) y el área obtenida con el programa.

Día	Mes	Área (*HP) en cm ²	Área (*HCpP) en Pixeles	Área (*HCpP) en cm ²	% de Error
7	Junio	2:806	1302	2:81	0:142
9	Junio	3:409	1543	3:33	2:31
12	Junio	3:125	1699	3:67	17:44
13	Junio	3:200	1745	3:77	7:71
14	Junio	4:02	1786	3:86	3:98
15	Junio	4:5	1955	4:23	6
16	Junio	5:8	2672	5:78	0:34
18	Junio	4:87	2757	5:07	4:10
20	Junio	4:75	1982	4:28	9:89
21	Junio	5:96	2980	5:7	8:05
22	Junio	6:36	3019	6:53	2:67
23	Junio	7:22	3424	7:40	2:49
24	Junio	6:23	4444	6:65	6:74
26	Junio	7:17	4621	6:89	3:905
27	Junio	8:75	5587	8:94	2:17
28	Junio	10:7	6100	9:76	8:78
29	Junio	11:06	6090	10:36	6:32
30	Junio	12:7	6829	12:31	3:07

(*HP: Hoja Pesada; *HCpP: Hoja Calculada por el Programa)

Día	Mes	Área (*HP) en cm ²	Área (*HCpP) en Pixeles	Área (*HCpP) en cm ²	% de Error
2	Julio	11:59	7199	11:51	0:69
3	Julio	13:43	7863	12:58	6:32
4	Julio	10:54	5963	10:02	4:93
5	Julio	14:06	7931	14:27	1:49
6	Julio	14:36	8633	13:81	3:83
9	Julio	16:97	10963	17:38	2:41
10	Julio	17:93	11008	17:61	1:78
11	Julio	18:67	11720	18:75	0:42
12	Julio	21:35	13406	21:45	0:46
13	Julio	27:44	16626	26:60	3:06
14	Julio	27:87	17802	28:48	2:18
15	Julio	32:64	19948	31:92	2:20
16	Julio	30:32	18960	30:34	0:06
17	Julio	29:42	18866	30:18	2:58
18	Julio	34:37	21570	34:51	0:40
19	Julio	43:93	27187	43:50	0:97
20	Julio	43:86	26304	42:09	4:03
21	Julio	52:68	32508	52:01	1:28
24	Julio	65:46	9054	65:19	0:41
25	Julio	52:48	7196	51:81	1:27
26	Julio	71:20	10153	72:38	1:65
27	Julio	66:73	8992	64:74	2:98
28	Julio	72:95	10370	74:66	2:34
31	Julio	67:85	10096	72:69	7:13

(*HP: Hoja Pesada; *HCpP: Hoja Calculada por el Programa)

Día	Mes	Área (*HP) en cm ²	Área (*HCpP) en Píxeles	Área (*HCpP) en cm ²	% de Error
2	Agosto	70:94	11108	79:98	12:74
3	Agosto	78:50	11244	80:96	3:13
4	Agosto	81:40	11628	83:72	2:85
7	Agosto	79:88	11897	85:66	7:23
8	Agosto	86:67	12110	87:19	0:59
9	Agosto	85:14	12505	90:04	5:75
10	Agosto	88:8	12749	91:79	3:05
14	Agosto	79:93	12313	88:65	10:90
15	Agosto	84:72	12784	92:05	8:65
16	Agosto	89:15	13279	95:61	7:24
17	Agosto	76:12	11655	83:92	10:24
18	Agosto	80:60	12065	86:87	1:12

(*HP: Hoja Pesada; *HCpP: Hoja Calculada por el Programa)

En la siguiente tabla se muestran las áreas en cm² obtenidas por el análisis de imágenes por computadora de las series de plantas restantes, las cuales son representadas por H1B, H1C, H2B, H2C, H3C, H4B, H4B y H5B.

Dia	Mes	H1B (cm ²)	H1C (cm ²)	H2B (cm ²)	H2C (cm ²)	H3C (cm ²)	H4B (cm ²)	H5B (cm ²)
7	Junio	2:279	1:010	0:963	1:068	2:479	1:456	1:245
9	Junio	2:127	1:031	1:660	1:741	2:008	2:101	1:820
12	Junio	1:813	1:055	1:698	1:190	2:231	2:351	1:988
13	Junio	2:169	1:126	1:208	1:195	2:259	2:635	2:214
14	Junio	3:164	1:199	1:510	1:510	2:881	2:696	2:401
15	Junio	2:788	1:260	1:683	1:693	2:842	3:869	2:372
16	Junio	2:708	1:433	1:764	1:727	3:586	4:549	2:322
18	Junio	2:385	1:641	1:793	1:768	3:165	3:192	2:923
20	Junio	2:725	1:645	1:807	1:807	3:301	3:790	3:128
21	Junio	2:479	1:666	2:107	2:094	4:095	5:200	3:628
22	Junio	3:733	1:677	2:264	2:214	4:210	5:125	4:730
23	Junio	4:321	1:729	2:920	2:884	6:184	4:907	4:555
24	Junio	4:170	2:035	3:044	3:024	6:186	5:404	5:026
26	Junio	5:224	2:106	3:561	3:866	6:119	6:052	6:076
27	Junio	6:253	2:231	3:127	3:233	6:506	8:549	5:872
28	Junio	6:409	3:173	4:218	4:248	8:806	7:986	5:813
29	Junio	7:021	3:372	4:269	4:554	9:431	9:430	6:204

Dia	Mes	H1B (cm ²)	H1C (cm ²)	H2B (cm ²)	H2C (cm ²)	H3C (cm ²)	H4B (cm ²)	H5B (cm ²)
30	Junio	7:509	3:978	5:051	5:416	10:323	11:534	6:269
2	Julio	7:962	5:579	5:445	5:570	10:587	11:475	6:037
3	Julio	6:991	3:765	5:632	5:948	7:609	9:486	8:636
4	Julio	7:576	5:095	4:695	4:727	10:806	12:801	8:263
5	Julio	5:911	5:128	5:834	5:781	11:086	12:779	9:489
6	Julio	8:852	5:626	6:165	6:189	13:667	16:709	13:296
9	Julio	8:188	5:771	9:065	9:282	17:395	17:343	13:353
10	Julio	10:210	5:938	8:961	8:034	15:928	17:376	14:011
11	Julio	11:375	5:346	9:084	9:580	18:648	18:556	17:245
12	Julio	12:876	5:475	11:465	11:275	22:148	20:974	16:797
13	Julio	13:728	5:803	12:590	12:833	22:038	26:800	18:879
14	Julio	16:354	6:084	13:406	12:993	26:221	26:069	17:543
15	Julio	16:702	6:954	15:062	14:936	28:522	29:597	20:228
16	Julio	19:949	7:522	16:099	16:741	30:914	30:615	18:767
17	Julio	21:068	6:095	15:451	19:101	29:645	30:919	20:079
18	Julio	25:755	8:183	16:061	16:906	33:290	40:502	23:494
19	Julio	26:608	8:329	19:994	21:207	38:712	34:945	29:677
20	Julio	30:104	9:327	20:724	19:884	44:396	43:341	35:239

Día	Mes	H1B (cm ²)	H1C (cm ²)	H2B (cm ²)	H2C (cm ²)	H3C (cm ²)	H4B (cm ²)	H5B (cm ²)
21	Julio	45:404	16:885	24:048	23:382	46:279	56:466	33:446
24	Julio	46:824	12:103	29:709	30:933	61:959	54:529	44:282
25	Julio	53:031	21:911	32:106	33:604	69:995	70:866	41:899
26	Julio	60:246	22:623	34:735	38:018	81:415	66:971	41:726
27	Julio	64:487	21:601	38:860	44:239	81:329	67:648	44:246
28	Julio	66:625	27:224	38:191	42:979	83:042	71:435	40:733
31	Julio	50:518	27:606	49:222	42:936	95:996	69:225	37:500
2	Agosto	67:288	33:928	52:088	48:509	107:546	76:915	36:441
3	Agosto	67:921	35:527	53:665	51:224	103:787	78:593	41:481
4	Agosto	69:988	36:167	59:295	57:178	122:623	88:270	36:657
7	Agosto	74:791	31:926	59:807	59:691	119:844	77:368	37:168
8	Agosto	64:775	40:596	60:951	61:405	128:816	84:461	33:842
9	Agosto	83:158	42:115	59:771	64:976	132:733	80:227	32:675
10	Agosto	85:476	36:095	64:638	59:511	128:909	77:491	38:738
14	Agosto	87:154	49:546	63:292	63:695	131:559	79:229	39:069
15	Agosto	80:868	47:940	62:716	64:480	138:849	73:279	38:889
16	Agosto	77:289	40:545	59:828	72:436	129:889	61:895	36:909
17	Agosto	72:091	46:968	60:663	62:111	112:572	60:030	39:451
18	Agosto	66:690	50:410	66:042	73:207	129:845	58:575	40:330

De las series de espinacas, H2B y H2C se tiene un crecimiento semejante un ejemplo es el día 21 de julio de H2B que tiene un área de 24:048cm² y en H2C en el mismo día se tiene un área de 23:382cm². Por el contrario las series H1B y H1C distan mucho en el crecimiento de áreas, esto variaciones de crecimiento en áreas de hoja en el transcurso del tiempo, es debido, a que cada una de las plantas recibe distinta cantidad de radiación solar.

De estas tablas se puede observar que existen variaciones de tipo oscilatorio en el proceso de crecimiento (ver también Fig. 4.12).

Las plantas por lo general están direccionadas hacia donde hay mayor cantidad de luz solar.

Por esta razón, la orientación de la planta no siempre es exactamente la misma, por lo tanto, el área de hoja determinada (siendo el área de la proyección perpendicular de la planta siempre el mismo plano) varía y puede en ciertos días, no reflejar correctamente el crecimiento de la planta.

Por otro lado, la Fig. 4.12 muestra el porcentaje de error por día, se tiene un error máximo del 17% que corresponde al día 12 del experimento y un error mínimo del 0.06% que corresponde al día 39 del experimento, ...nalmente la Fig. 4.13 representa el error promedio de todas las mediciones tomadas del 1.724% con respecto al método empírico.

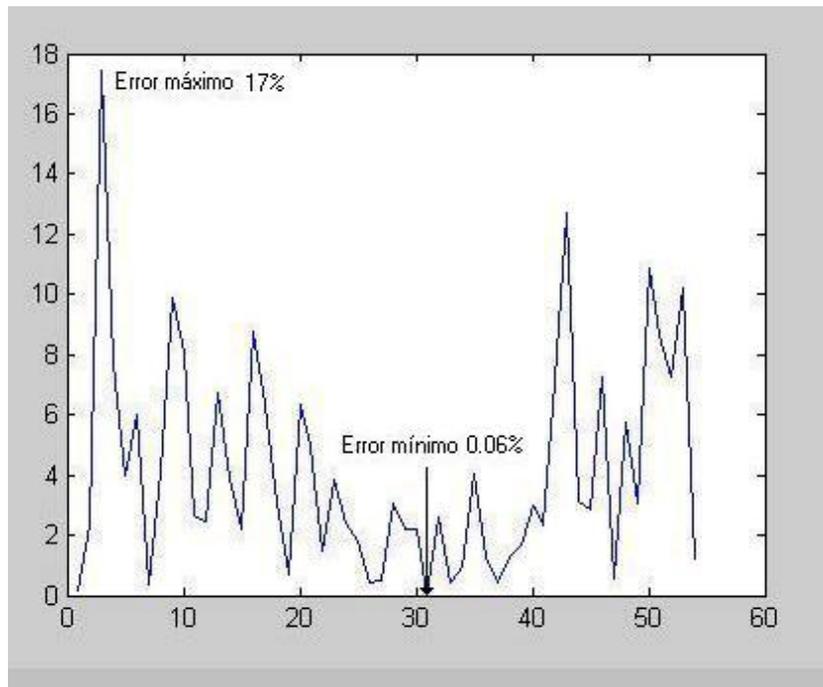


Fig. 4.12 Porcentaje de error de cada día con respecto al área esperada (método empírico)

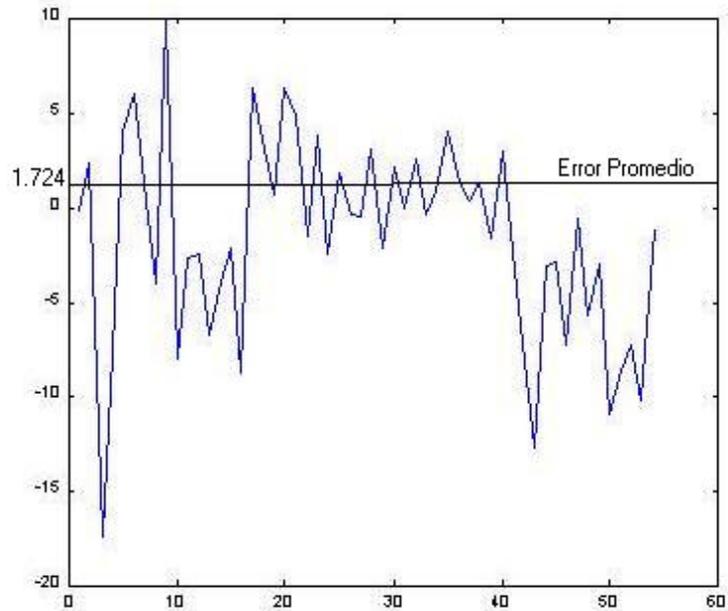


Fig. 4.13 Error promedio de todas las mediciones de áreas de las espinacas.

4.5 Representación Gráfica del Proceso de Crecimiento

De la curva de crecimiento de la espinaca, se tiene un ciclo de vida que describe tres fases: primera fase, el comienzo de crecimiento de la planta, esta fase es conocida como Fase de crecimiento Exponencial, segunda fase, la planta ha alcanzado un crecimiento completo, esta fase es llamada Fase de crecimiento Lineal, tercera fase, describe la de maduración y senescencia, es en esta fase que la planta ha dado granos, frutos o flor, a esta etapa se le conoce como: Fase de crecimiento de Senescencia, ver Fig. 4.14.

Al hacer una comparación entre el método empírico destructivo y el método no destructivo aquí propuesto, se observa que se tienen un seguimiento de crecimiento similar entre ambas con un error promedio del 1.724% , ver Fig. 4.15.

En base a estos datos se puede decir que el método propuesto es factible para realizar estudios que den resultados muy aproximados al área real de las plantas dejando intacto al cultivo.

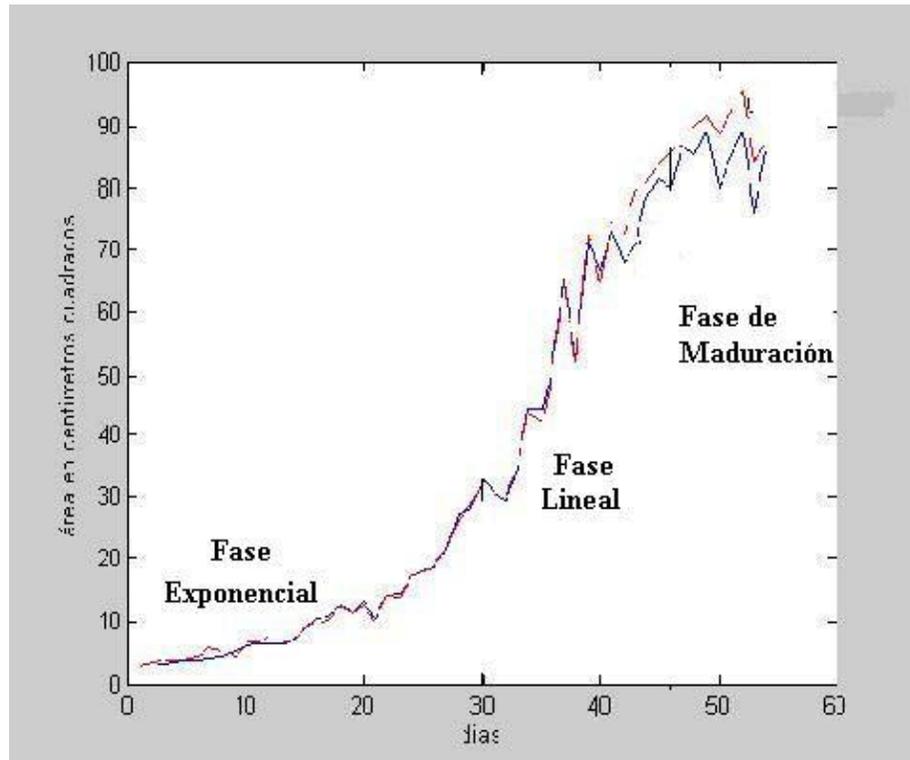


Fig. 4.14 Representación de las Fases de Crecimiento

Durante la etapa exponencial, los espacios que hay entre las plantas aún no son cubiertos por las hojas de las espinacas, cada hoja formada contribuye a luz interceptada, por lo que se incrementa el crecimiento de la planta, pasando los días, las hojas empiezan a traslaparse creando más sombra entre ellas, por lo que se tiene un índice de área de hoja mayor, la cual resulta de apenas un incremento de intercepción de luz, pero ahora la fase exponencial ha pasado a la fase lineal.

Cuando el agua y nitrógeno son adecuados, el índice de área de hoja se excede, pero un valor alto no contribuye más a la producción de biomasa (Capítulo 1): restos de un crecimiento lineal. La formación de la materia seca ocurre durante esta fase. La fase de crecimiento ...nal, la senescencia empieza cuando la intercepción de luz entre hojas decreta, por lo el índice de área de hoja también sufre decrementos en su crecimiento. Entonces el crecimiento exponencial solo ocurre cuando la cobertura de suelo es pequeña, la transición del crecimiento lineal toma lugar cuando la cobertura de suelo es total o completa, por último la etapa de senescencia es

cuando la planta a dejado de crecer.

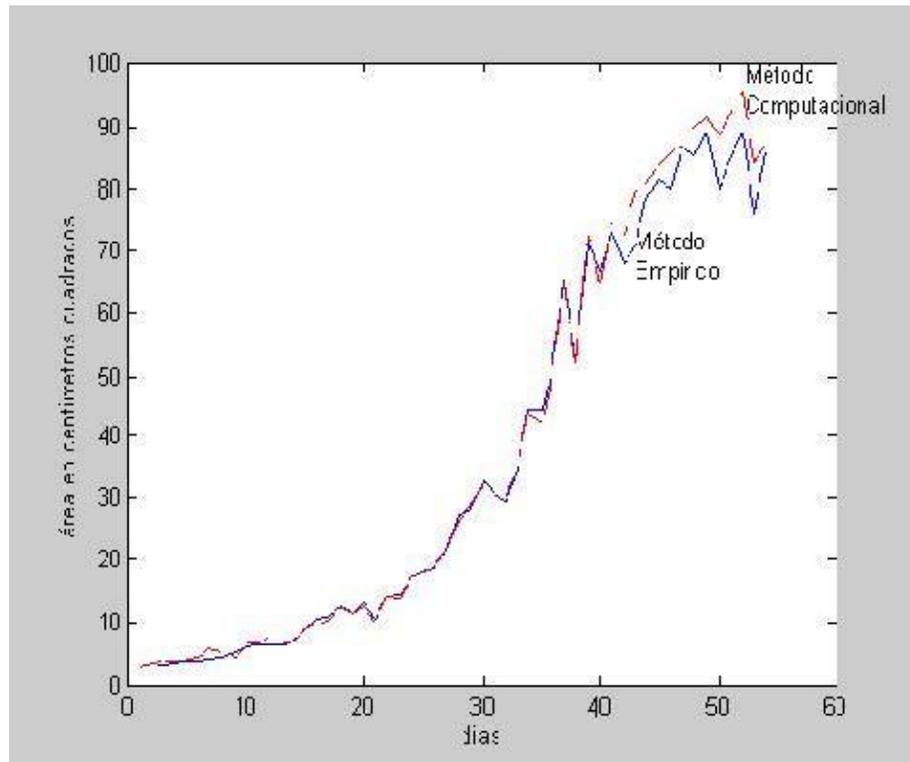


Fig 4.15. Comparaciones de áreas por el método empírico y método computacional

De la Fig. 4.15 se observa que el crecimiento obtenido por el método manual contra el método de procesamiento digital de imágenes en los primeros días las áreas por ambos métodos son casi iguales, en la segunda etapa el crecimiento cada vez va siendo más rápido, hasta que se empieza a estabilizar en la tercera etapa. En esta última etapa es cuando la planta deja de crecer y su comportamiento se mantiene sin algún cambio en cuanto al crecimiento en altura y número de hojas, y es cuando la espinaca empieza a florecer.

Existen tres funciones más importantes usadas para describir la curva de crecimiento de desarrollo de una cosecha las cuales son: la Función Logística, la Función Gompertz y la Función Richards. Para obtener el modelo de crecimiento de la espinaca se utilizó la Función Logística debido a su sencillez. Esta función fue introducida por Robertson en 1923[12], teniendo una forma Sigmoide. Esta tiene una aproximación de crecimiento exponencial en el primer estado, seguida por una aproximación de crecimiento lineal y ...nalmente por un lento y bajo crecimiento

ambos llevan al envejecimiento de la cosecha, lo cual puede ser descrito como:

$$y = y(t) = \hat{y} \frac{e^{ky(t - t_i)}}{1 + e^{ky(t - t_i)}} \quad (4.1)$$

La ec. 4.1 representa una Función Logística, donde y representa la materia seca, \hat{y} es el máximo valor alcanzado por y , k es una constante de proporcionalidad entre RGR (razón de crecimiento relativo) y la materia seca

$$RGR = \frac{\dot{y}}{y} = k(t - t_i)$$

donde:

$$k = \frac{dRGR}{dy}$$

Usualmente la curva de crecimiento es clasificada en tres diferentes regiones como fue antes mencionado: región exponencial, región lineal y región logarítmica.

La parte exponencial de la curva bajo el punto de inflexión (t_i), caracteriza el crecimiento acelerado, la parte lineal alrededor del punto de inflexión caracteriza la razón de crecimiento estacionario y la parte logarítmica arriba del punto de inflexión caracteriza la desaceleración de crecimiento.

Para obtener una curva logística apropiada de la producción del peso de materia seca se siguen los pasos siguientes:

1. Graficar la respuesta en tiempo del peso de materia seca, es decir, y contra t : Al igual que graficar la función logística (ec. 4.1) contra t :

El valor de \hat{y} es especificado en los siguientes puntos.

2. El valor desconocido \hat{y} es obtenido apropiadamente de la gráfica de la ec. 4.2 contra t , ver Fig. 4.17(recta verde),

$$\ln \frac{y}{\hat{y} - y} = z_1 \quad (4.2)$$

3. Finalmente la ecuación:

$$z_1 = ky(t - t_i)$$

es graficada para obtener el punto de inflexión, t^1 ; al igual que la constante de proporcionalidad k ; esta constante se varia hasta que el comportamiento de la gráfica se aproxime lo más posible a la gráfica obtenida por la ec. 4.2, ver (Fig. 4.17)(recta roja), los valores obtenidos para k y t^1 son:

$$k = 0.00110$$

$$t^1 = 35$$

y el valor de y se obtiene de la Fig. 4.16 :

$$y = 95$$

donde y nos indica el máximo crecimiento de la materia seca.

Estos pasos son repetidos para cada una de las series para así obtener la curva de crecimiento de cada espinaca.

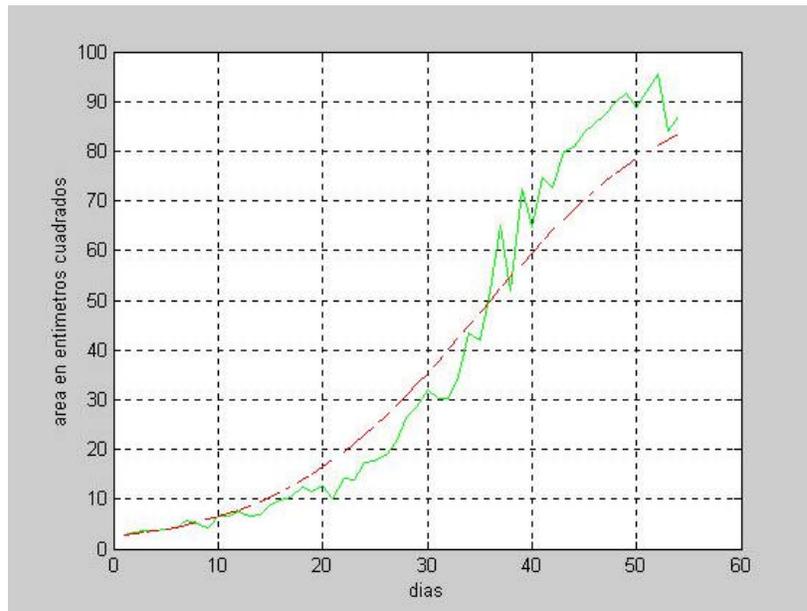


Fig. 4.16. Función logística y curva de crecimiento de la espinaca durante 2 meses de crecimiento.

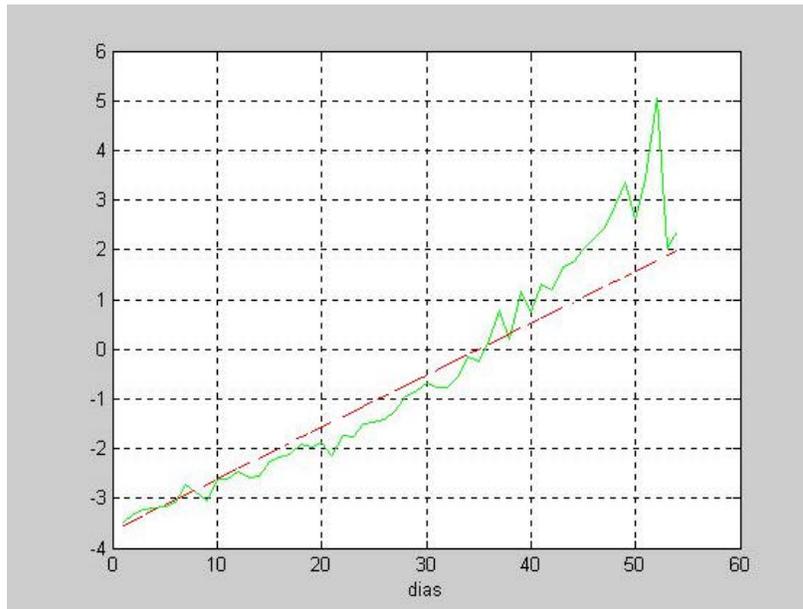


Fig. 4.17. Función de linearización (rojo) y Función de crecimiento linearizada (verde).

La Fig.4.16 muestra la curva (verde) de crecimiento de la espinaca obtenida por el método empírico, y la curva (rojo) es la función logística ecuación 4.1, usada para dar una aproximación a la curva de crecimiento de la espinaca. La Fig. 4.17 da la curva de crecimiento de la espinaca por el método empírico linearizada y la función de linearización es dada por la curva roja, ecuación 4.3. A continuación se dan las gráficas obtenidas por el método computacional y los

valores alcanzados por la materia seca.

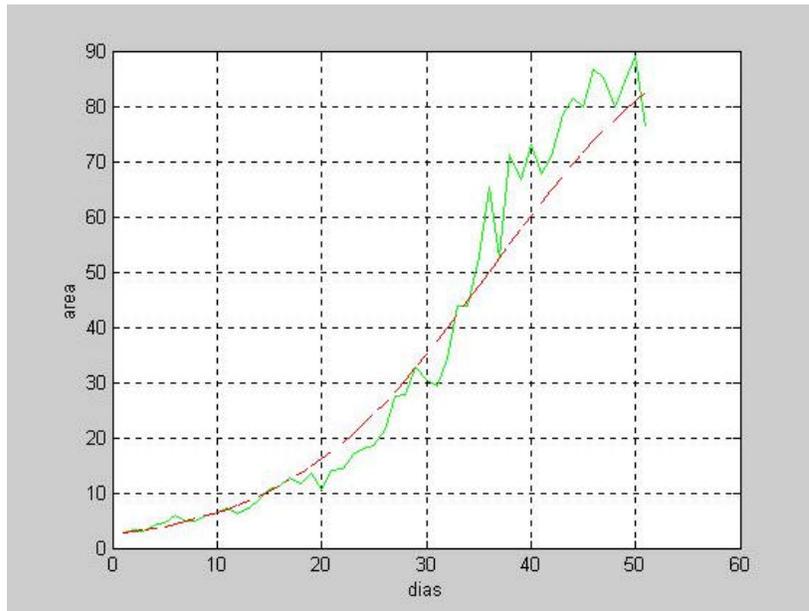


Fig. 4.18. Función logística y curva de crecimiento de la espinca durante 2 meses.

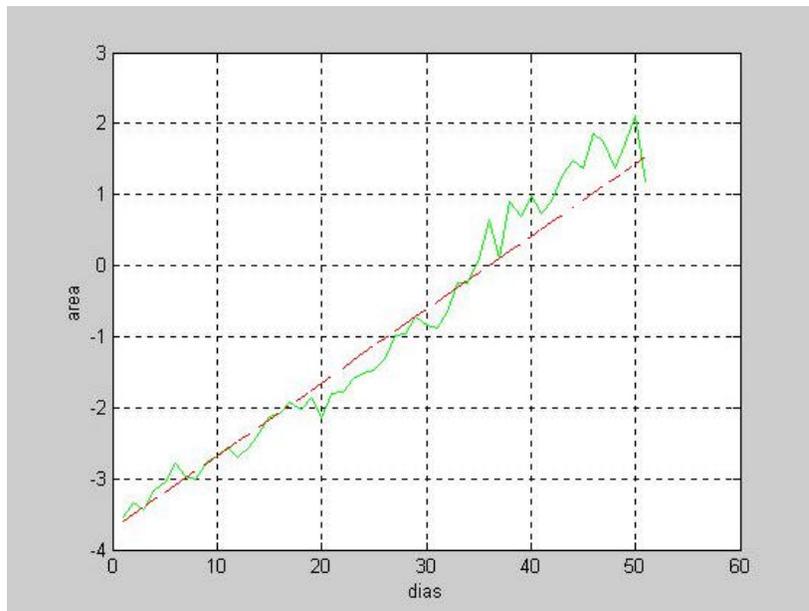


Fig. 4.19 Función de linearización (rojo) y función de crecimiento de la espinaca linearizada (verde).

Los valores desconocidos son:

$$\hat{y} = 106$$

$$t = 36$$

$$k = 0.00103$$

donde \hat{y} nos indica el máximo crecimiento de la materia seca y k nos da la razón de crecimiento relativa. Se observa que la diferencia del valor máximo alcanzado de la materia seca y la razón de crecimiento relativa entre el método empírico y el método computacional es baja.

La Fig.4.18 muestra la curva (verde) de crecimiento de la espinaca obtenida por el método computacional, y la curva (rojo) es la función logística ecuación 4.1, usada para dar una aproximación a la curva de crecimiento de la espinaca. La Fig. 4.19 da la curva de crecimiento de la espinaca por el método computacional linearizada y la función de linearización es dada por la curva roja, ecuación 4.3.

Las Figs. 4.18 y 4.19 son resultados obtenidos por el método de procesamiento digital de imágenes de la misma serie de fotografías obtenidas por el método empírico, estas tienen una mejor aproximación a la función logística que las curvas obtenidas por el Método Empírico, con lo cual se concluye que por este método se tiene una mayor aproximación a resultados reales.

A continuación se dan las curvas de crecimiento de las series restantes con sus respectivos valores que alcanzó la materia seca para realizar una aproximación a una Función Logística, estas series solo fueron analizadas por el método de procesamiento digital de imágenes.

Para la serie H1B se tienen:

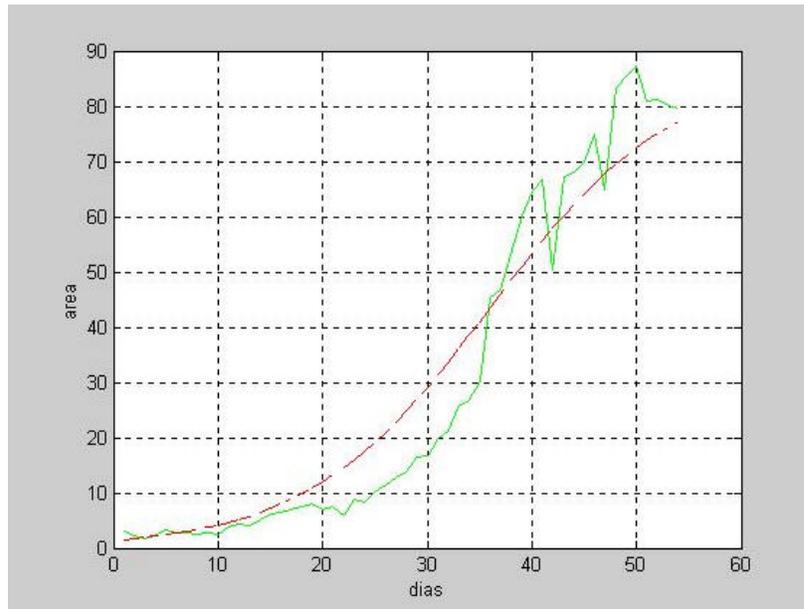


Fig. 4.20 Función logística y curva de crecimiento de la espinaca durante 2 meses.

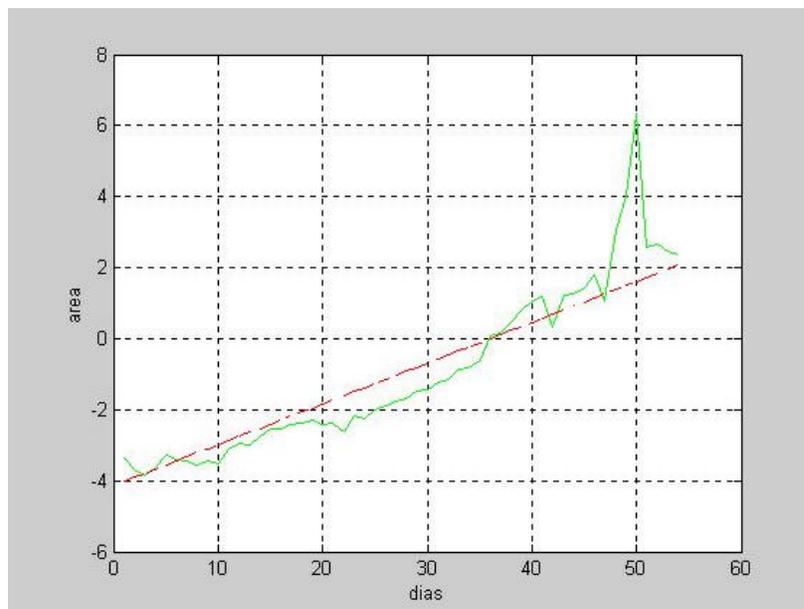


Fig. 4.21 Función de linearización (rojo) y función de crecimiento de la espinaca linearizada (verde).

$$y = 88; t = 35; K = 0.00132$$

Para la serie H1C se tienen:

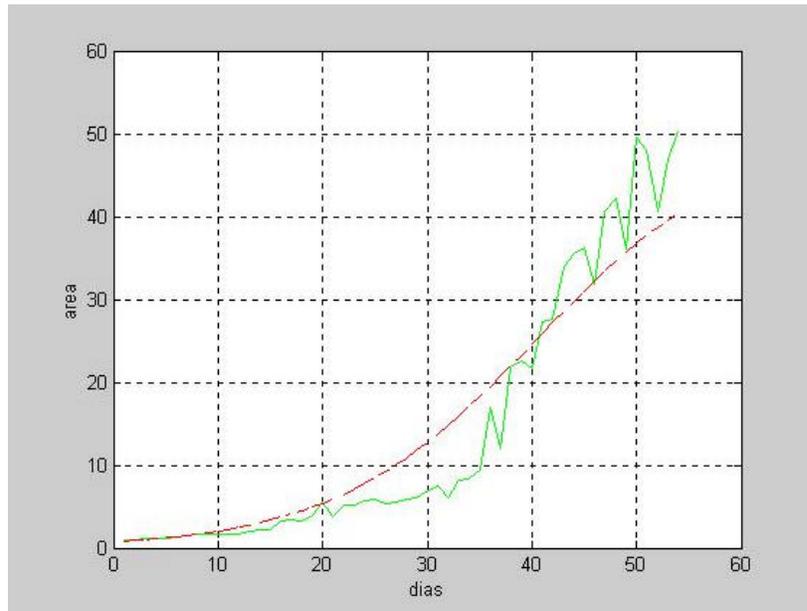


Fig. 4.22 Función logística y curva de crecimiento de la espinaca durante 2 meses.

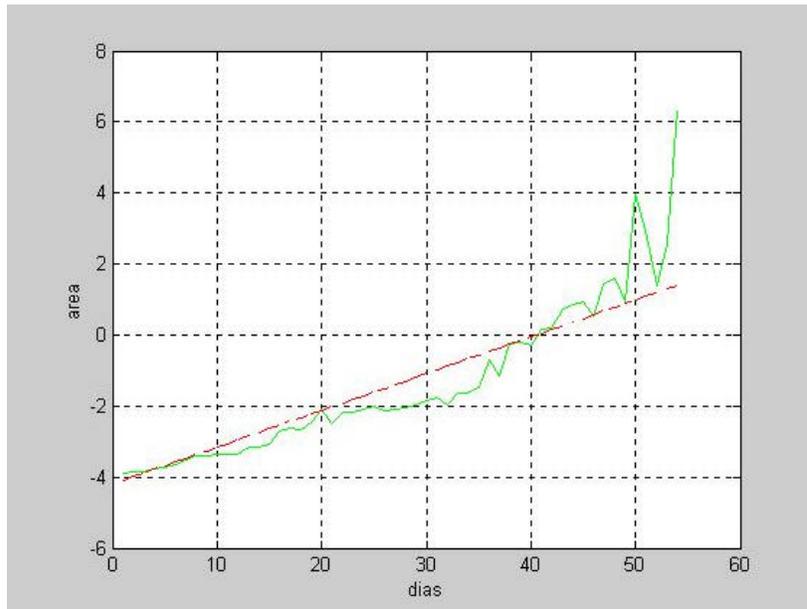


Fig. 4.23 Función de linearización (rojo) y función de crecimiento de la espinaca linearizada (verde).

$$y = 50:5; t = 40:5; K = 0:00205$$

Para la serie H2B se tienen:

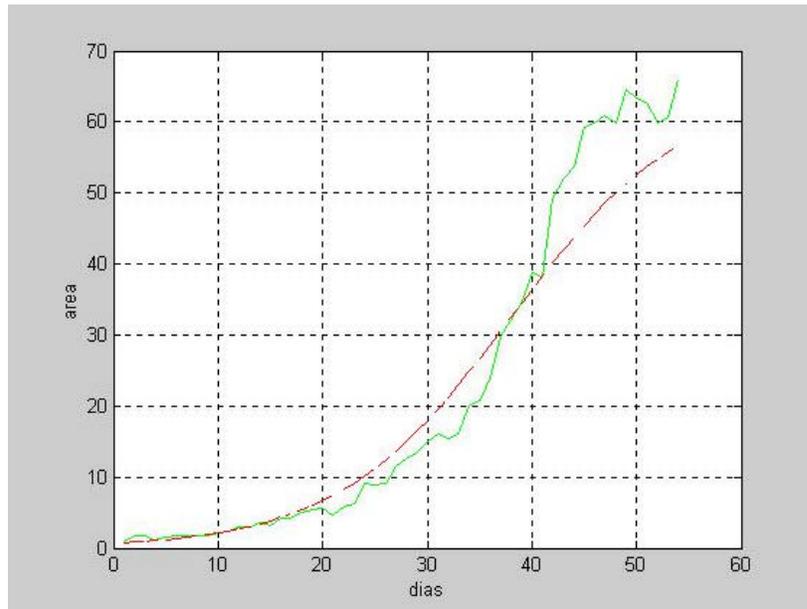


Fig. 4.24 Función logística y curva de crecimiento de la espinaca durante 2 meses.

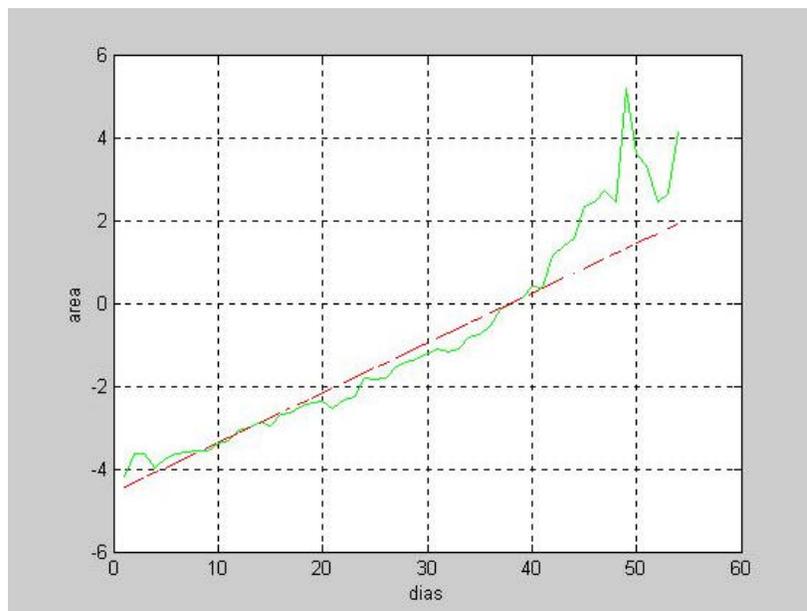


Fig. 4.25 Función de linearización (rojo) y función de crecimiento de la espinaca linearizada (verde).

$$y = 65; t = 38; K = 0.00185$$

Para la seire H2C se tienen:

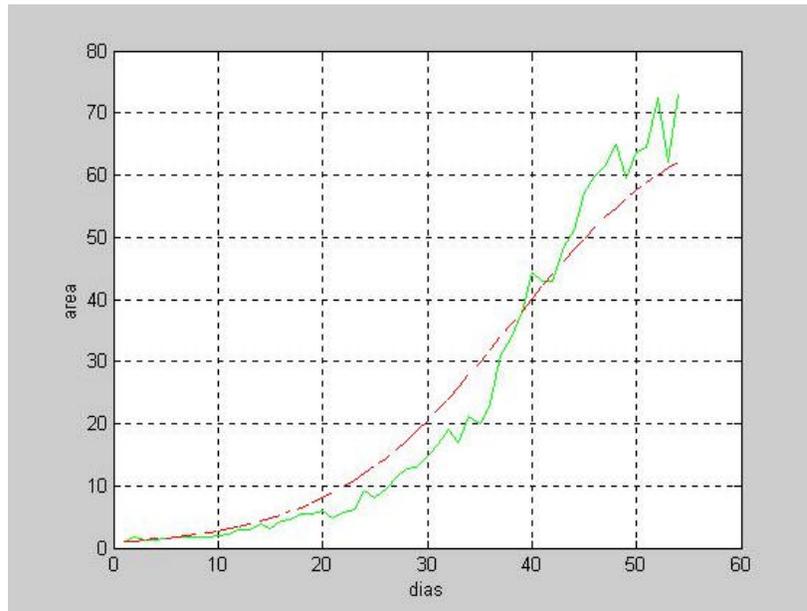


Fig. 4.26 Función logística y curva de crecimiento de la espinaca durante 2 meses.

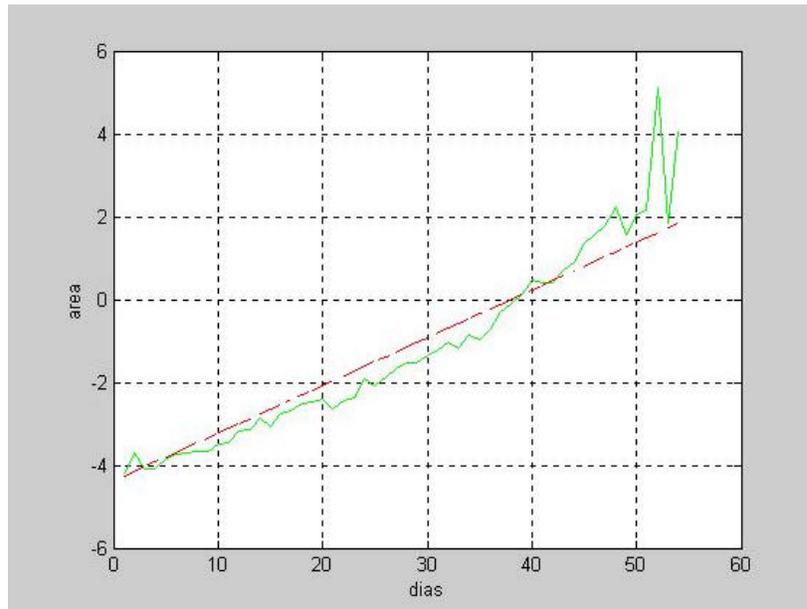


Fig. 4.27 Función de linearización (rojo) y función de crecimiento de la espinaca linearizada (verde).

$$\dot{y} = 72; t^{\dagger} = 38; K = 0:00160$$

Para la serie H3B se tienen:

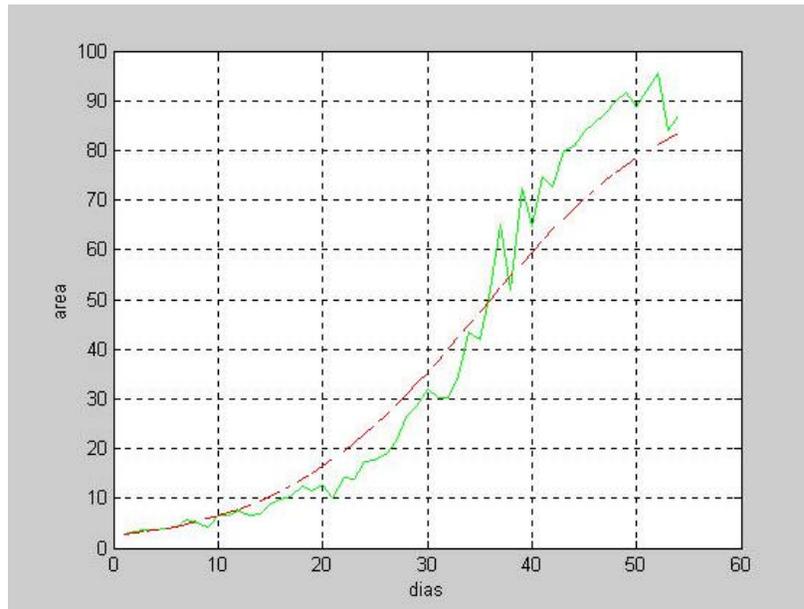


Fig. 4.28 Función logística y curva de crecimiento de la espinaca durante 2 meses.

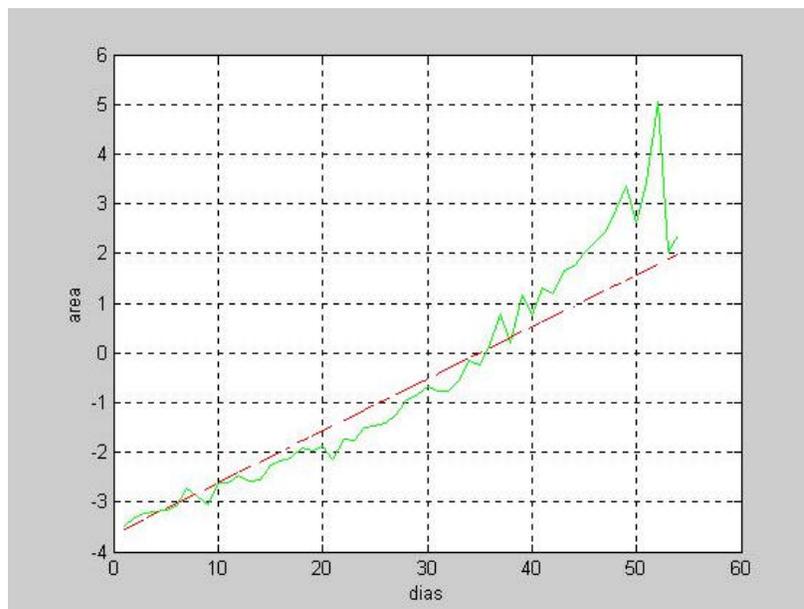


Fig. 4.29 Función de linearización (rojo) y función de crecimiento de la espinaca linearizada (verde).

$$y = 95; t = 35; K = 0.00110$$

Para la serie H3C se tienen:

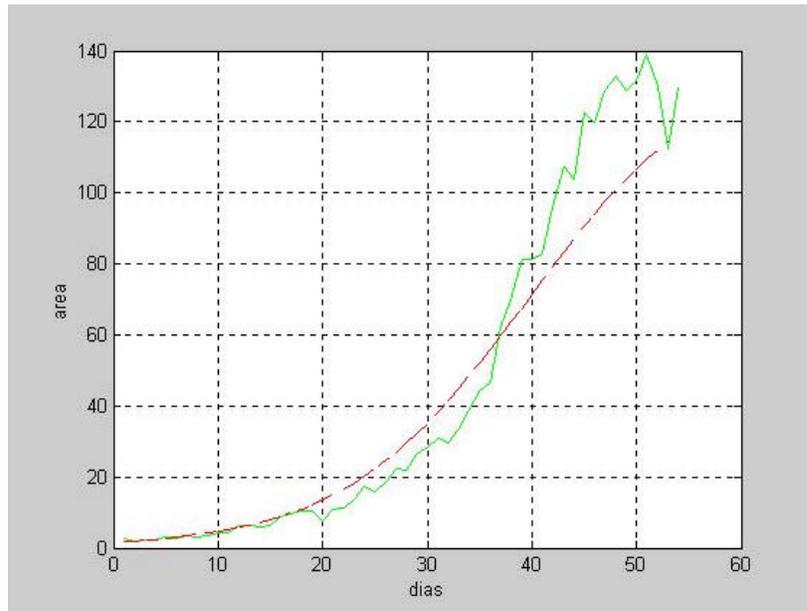


Fig. 4.30 Función logística y curva de crecimiento de la espinaca durante 2 meses.

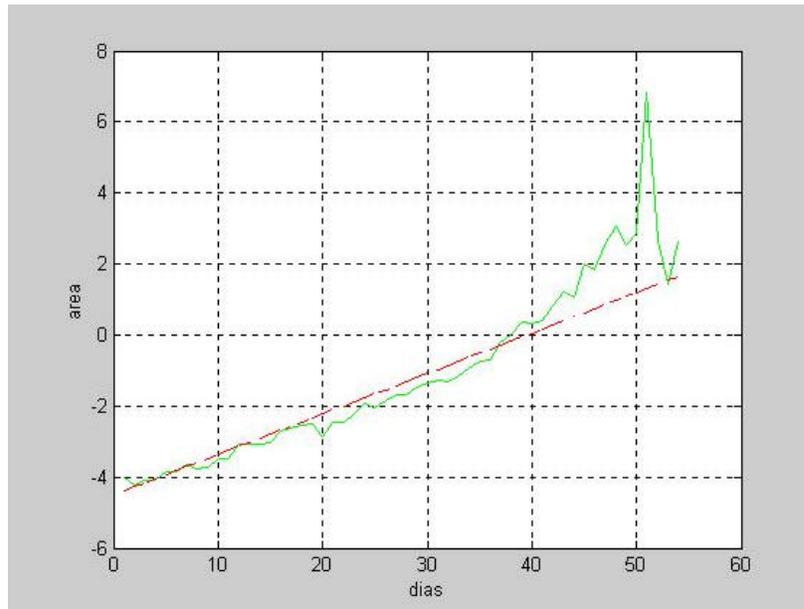


Fig. 4.31 Función de linearización (rojo) y función de crecimiento de la espinaca linearizada (verde).

$$\hat{y} = 139; \hat{t} = 37; K = 0:00820$$

Para la serie H4B se tienen:

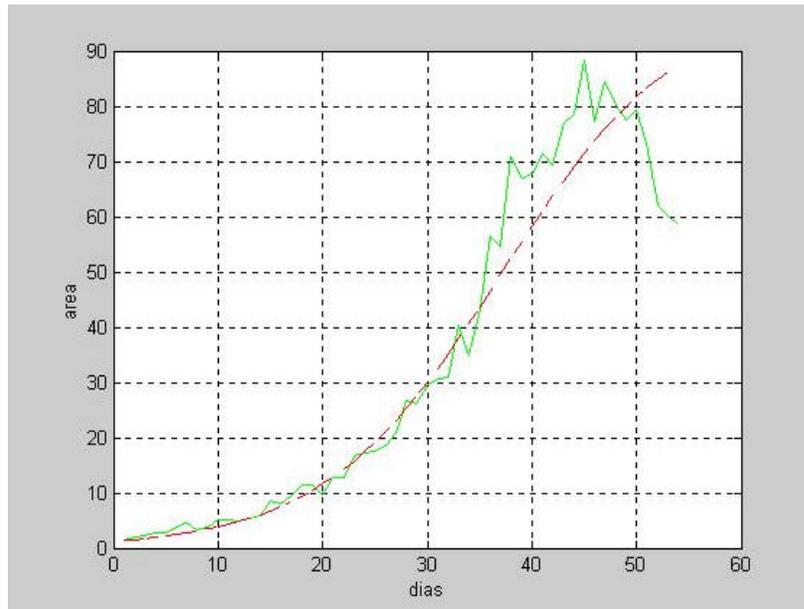


Fig. 4.32 Función logística y curva de crecimiento de la espinaca durante 2 meses.

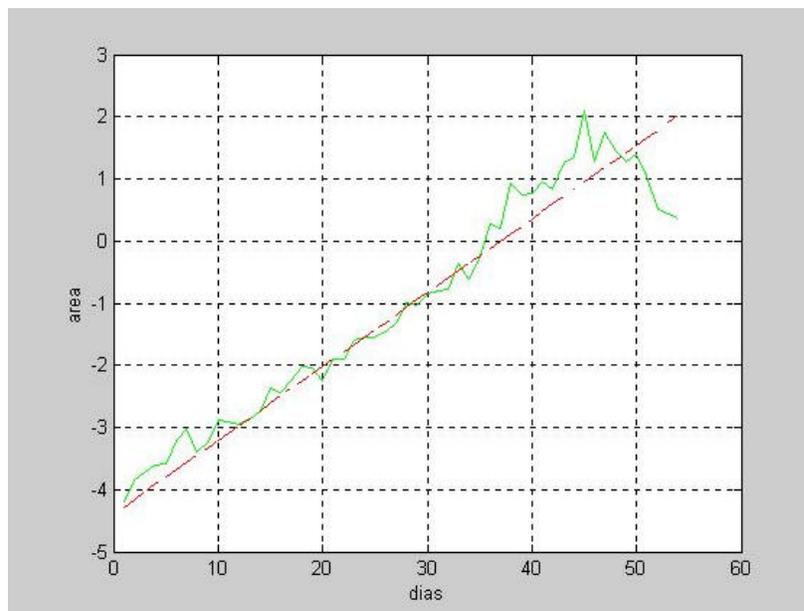


Fig. 4.33 Función de linearización (rojo) y función de crecimiento de la espinaca linearizada (verde).

$$y = 99; t = 37; K = 0.00120$$

Para la serie H5B se tienen:

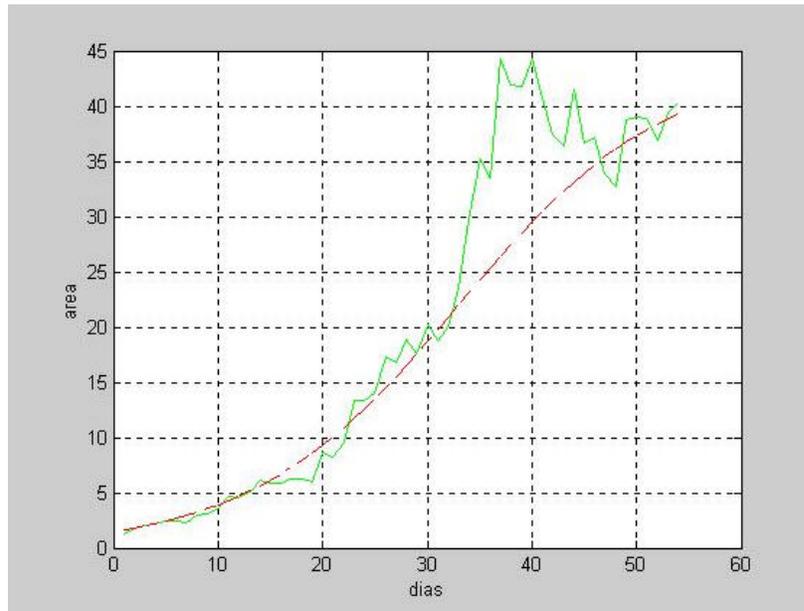


Fig. 4.34 Función logística y curva de crecimiento de la espinaca durante 2 meses.

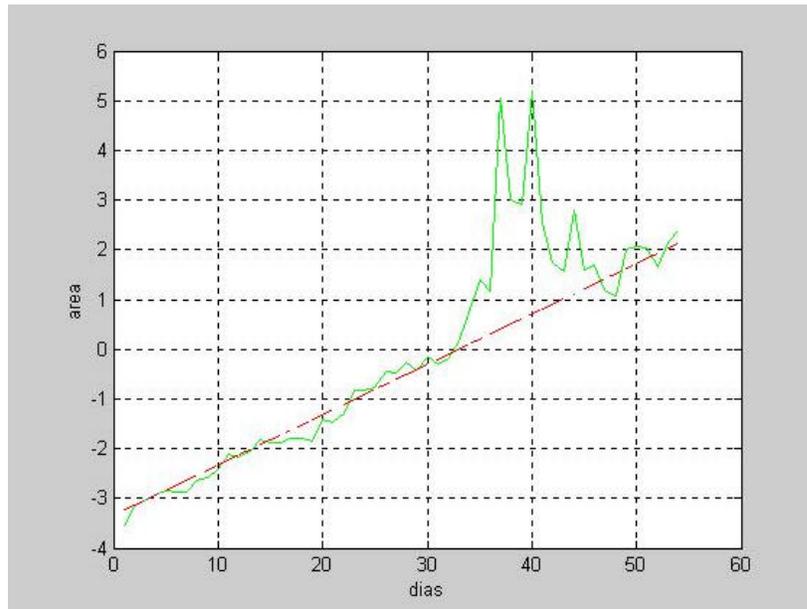


Fig. 4.35 Función de linearización (rojo) y función de crecimiento de la espinaca linearizada (verde).

$$\hat{y} = 44; \hat{t} = 33; K = 0:00230$$

La curva de crecimiento proporcional a todas las series es la siguiente:

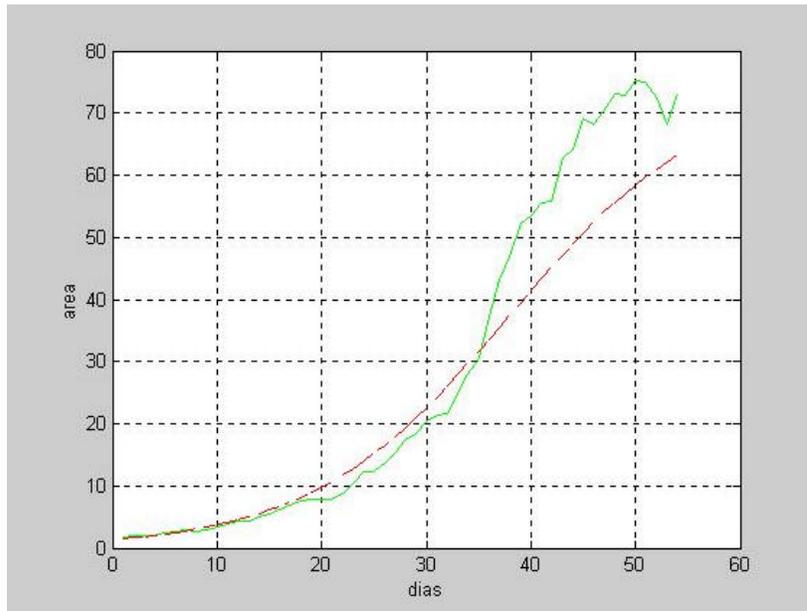


Fig. 4.36 Función logística y curva de crecimiento promedio de todas las series de espinaca.

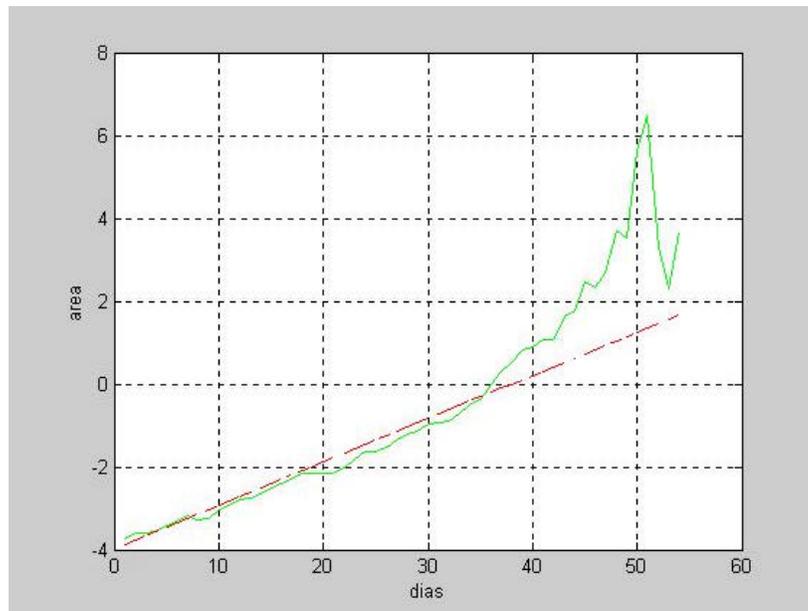


Fig. 4.37 Función de linearización (rojo) y función de crecimiento linearizada promedio de todas las series (verde).

$$y = 75; t = 38; K = 0.00140$$

Podemos concluir de estas últimas gráficas que el valor máximo alcanzado de la materia seca en promedio de todas las series fue de 75, en un tiempo promedio de 38 días.

Se observa que cada planta alcanzó un máximo valor de materia seca distinto, las plantas que al ser sembradas quedaron a la mitad de la maceta fueron las que crecieron más debido a que en ellas incidio mayor cantidad de rayos solares, otro efecto entre las plantas es la competencia de espacio quienes ganan mayor espacio son las que tienden a tener un máximo valor de materia seca mayor que las demás. En este caso las series H3B, H3C y H4B fueron las que alcanzaron un máximo valor de materia seca, el cual esta entre los 106 y los 136.

CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

Durante muchos años en nuestro país se han hecho investigaciones en cultivos de plantas utilizando métodos destructivos, por lo que es importante el desarrollo de nuevos procesos que permitan el estudio de cultivo de plantas sin ser afectados, es por ello de la gran importancia que tiene este trabajo de tesis, ya que da una solución alternativa no destructiva para el estudio de las plantas, en nuestro caso se obtuvo el área de hoja de la espinaca, la cual está correlacionada con el peso de la materia seca.

El método propuesto para obtener el área de hoja de la espinaca, resultó ser aproximado a los resultados que se esperaban por el método empírico.

Este método No-destructivo es basado en el monitoreo de las plantas por medio de una cámara de video (WebCam) durante todo el período de crecimiento, las imágenes tomadas diariamente son almacenadas dentro de unos archivos, para después ser procesadas en un programa que analiza imágenes digitales y así obtener el área de hoja de las plantas.

Se implementó un sistema de adquisición de imágenes de bajo costo en comparación con [?], [2] y [5], los cuales utilizan un sistema de adquisición de imágenes de tecnología de punta.

Se realizaron dos métodos diferentes de obtención del área de una planta, el primero es un método empírico y el segundo es un método que utiliza técnicas del procesamiento digital de imágenes, al realizar comparaciones de resultados entre los dos métodos se obtuvo un error máximo y un error mínimo de las mediciones con respecto al método empírico del 17% y 0.06% respectivamente, además tiene un error promedio del 1.724%, significa que si una planta por el método empírico tiene un área de 100cm² entonces por el método propuesto se tiene un área

de 98:276cm²:

En base a los datos obtenidos del área de hoja de la espinaca en comparación del los datos obtenidos por el método empírico, se puede decir, que el método propuesto es factible para realizar estudios que den resultados muy aproximados al área real de las plantas dejando intacto al cultivo.

Estos resultados mejoraron el porcentaje de error obtenido por [5], en el cual se tuvo un error del 5%.

Por otro lado, existe poca bibliografía con la que este trabajo pueda ser comparado ya que como se menciona en la introducción resulta difícil el trabajo con este tipo de imágenes. Por lo que en comparación con los trabajos que podrían relacionarse se tiene, que el método propuesto es un método alternativo de bajo costo y sencillo de realizar, ya que no fue necesario el uso de cámaras infrarrojas, filtros para la cámara y películas sobre la tierra del cultivo, con el fin de separar el objeto (planta) del fondo (tierra).

Todo el material usado en la realización del método propuesto en esta tesis fue relativamente de bajo costo: se utilizó una PC estándar, una cámara WebCam muy sencilla en cuestión de uso, se trabajó con una plataforma de software no especializada, dado a que el paquete DIAS es de uso general para realizar procesamiento digital de imágenes, además es de bajo costo para el usuario.

Para que otro usuario pueda aplicar el método propuesto en esta tesis, se recomienda tener a consideración lo siguiente:

1. Tener un lugar específico para la obtención de las imágenes, manteniendo la iluminación lo más constante posible.
2. Utilizar una lámpara semi-esférica para eliminar sombras que pudiesen alterar la imagen digital con la planta.
3. En lugar donde sean plantadas las hortalizas o cualquier otro tipo de planta, es recomendable que la maceta y suelo sean de color negro, se puede poner una película negra en el suelo y cubrir la maceta antes de tomar una fotografía.
4. No tener objetos que al ser iluminados, se reflejen y distorsionen la imagen.

5. Calibrar la cámara para evitar problemas de búsqueda de factores que normalizen las mediciones y la conversión de píxeles a centímetros.

Sobre la base de las experiencias y de las ideas surgidas durante el desarrollo de esta tesis, podemos mencionar las siguientes perspectivas, dando camino a investigaciones futuras:

1. Obtener imágenes desde varios ángulos, para poder determinar con mayor precisión el área de la planta. Entonces cada planta, en un momento dado sería representada por una serie de imágenes de las cuales cada una produce una estimación del área foliar. Sería un tema de investigación el como unir estas estimaciones en una nueva aproximación del área total de las hojas de la planta.
2. Realizar un sistema de adquisición de imágenes en 3D, para determinar propiedades de la planta como área foliar total (sobre la base de métodos geométricos), el grosor y altura de la planta.

Durante el desarrollo de la tesis se presentaron diferentes problemas, los cuales, conjuntamente con su solución se explican brevemente a continuación:

- ² Debido a que las plantas fueron iluminadas con focos incandescentes y luz solar la cual entraba por una ventana, la iluminación de la escena era variable y no controlable. Además, la cámara utilizada a menudo no producía un buen contraste, esto causó que en algunas imágenes digitales captadas no se logre la separación de la planta del fondo de manera automática. Por ello el programa desarrollado incluye la posibilidad de generar el contorno de la planta a analizar de manera interactiva con el ratón de la PC.
- ² Al momento de convertir las áreas calculadas en píxeles a áreas en centímetros cuadrados, se tuvo que tomar en cuenta, que la cámara obtuvo fotografías de una resolución ...ja pero con diferentes acercamientos. Eso se resolvió por una normalización de las imágenes aplicando factores correspondientes de escalamiento.
- ² El uso del paquete DIAS puede ser difícil para un usuario que no conoce nada sobre el procesamiento digital de imágenes. Por lo que se procuró desarrollar un programa que fuese fácil de trabajar, es por ello que existen varios comentarios dentro del mismo

programa al ser compilado, esto es debido a que se pensaba entregar este programa a la universidad de Chapingo.

APÉNDICE

Aquí se presenta el listado del programa, detalladamente, con el cual se determina el área del espinacas.

\$INICIO

RESET; /Pone la gráfica en su estado estandar inicial/

PSIZE 400 400 2; /Abre 2 imágenes de 400x400 píxeles/

PINP; /Da la posibilidad de leer una imagen de espinaca (archivo seleccionado manualmente)/

PINV; /invierte los valores de gris de la imagen 1/

\$OBGRANDE

//Nos permite eliminar Objetos grandes dentro de la imagen y además nos da la opción de decidir si aún se desea seguir eliminando objetos grandes (en este caso en particular los objetos grandes pertenecen a la maceta).

WNDWSEL 1 XI YI XA YA / permite la selección interactiva de una ventana rectangular (XI, XA) x (YI, YA) con el ratón en imagen 1, todos los procedimientos siguientes se llevan a cabo dentro de esta ventana./

PSET 0 1 XI YI XA YA /Pone el valor de gris 0 dentro de la ventana (XI, XA) x (YI, YA) /

\$DE_MANERA_MANUAL

//Permite encerrar interactivamente con el mouse un objeto muy cercano a las espinacas, y se nos da la opción de encerrar cuantos obstaculos pequeños deseemos.

CONTSEL 1 100000 2 /permite la selección interactiva con raton (botón derecho termina selección y botón izquierdo permite la selección de un contorno) de un contorno en imagen 1,

dicho contorno se guarda a partir de la dirección 100000./

CFILL 4 -1 100000 / Marca el contorno seleccionado de color 4 (azul claro) sin realizr modi...caciones de los valores de gris./

\$MEJORA_IMAGEN

//Realiza el mejoramiento de la imagen presente, sólo en el caso de tener varios objetos como obstaculos

CTBL 110 160

MEAN 1 1 XI YI XA YA /Realiza un ...ltro lineal del valor medio (aplicando una mascara de 3x3 píxeles) dentro de la ventana (XI, XA) x (YI, YA) en iamgen 1./

DILATE 1 1 4 /Dilatación de imagen 1 con 4-vecino./

ERODE 1 1 4 /Erosión de la imagen 1 con 4-vecino./

\$HISTOGRAMA

//Se obtiene el histograma de la imagen con la cual se esta trabajando, despues se obtiene el nivel de binarización, y se realiza una binarización a la imagen.

GRAYH 1 1 1 /Genera el histograma de la imagen./

VISH 254 2 1 /Visualiza el histograma generado./

THRESHOLDH LVL /Determina un umbral, LVL, de binarización a partir del histograma generado por el método de OTSU./

PBIN LVL 1 1 XI YI XA YA /Binariza la imagen 1 (dentro de la ventana (XI, XA) x (YI, YA)) con el umbral LVL

DILATE 1 1 4 XI YI XA YA

ERODE 1 1 8 XI YI XA YA

\$PRINCIPAL

//Es utilizado en el caso de no tener mucho ruido en la imagen, nos da la opción de encerrar a la planta en una ventana y ser procesasa ahí mismo.

\$VENTANA

//Da la opción de eliminar las ramas que se traslapan con la planata de manera interactiva por medio del mouse

\$DDC

//Realiza la eliminación de pequeñas basuras dentro de una ventana

CONTSEL 1 100000 1

CMARK 4 -1 100000

CFILL 4 -1 100000

\$BPDIC

//Realiza la búsqueda del contorno de la espinaca, dicho contorno es marcado y determina el área en pixeles de la espinaca

SEARCH X Y 1 35 XC YC THRS /Realiza la búsqueda de un punto de inicio con un valor de umbral THRS, haciendo un barrido de línea por línea./

CONTUR XC YC THRS 10000 300000 1 -1 2 /detecta el contorno de un objeto con valor de umbral THRS./

CMARK 5 -1 300000

CFEATR A C F L 300000 /Calcula rasgos como: área del contorno seleccionado, longitud del contorno seleccionado./

\$HUECOS

//Ayuda a determinar el área de los huecos que quedan dentro de un contorno convexo

\$HUE

//Realiza la selección de los huecos interactivamente y calcula el área en pixeles de los huecos

CONTSEL 1 70000 1

CMARK 6 -1 70000

CFILL 6 -1 70000

CFEATR A C F L 70000

\$FINALIZAR

//Realiza la conversión de pixeles a centímetros cuadrados, considerando los factores de escalamiento para normalizar las imágenes en todos sus tamaños., es decir, 320x240 y 160x120.

\$HOJAS

//Nos permite seleccionar una hoja, a la cual se le quiere calcular el área

\$HISTO

//Obtención del histograma perteneciente a la hoja elegida

GRAYH 1 1 1

```
THRESHOLDH LVL
MEAN 1 1 XI YI XA YA
PBIN LVL 1 1 XI YI XA YA
$TO_SEARCH
//Realiza el seguimiento de contornos y es marcado
$HOJ1
//Realiza la conversión de píxeles a centímetros cuadrados.
$PLANTA_FRAGIL
//Es utilizado en el caso de tener alguna planta pequeña que no se distinga muy bien en la
fotografía..a.
$DISTINCION
//Elección de la planta
CONTSEL 1 1000000
CMARK 2 -1 1000000
CFILL 2 -1 1000000
$FIN
//Da la opción de analizar otra imagen
$FIN1
//Termina el programa
```

Bibliografía

- [1] Yasushi Hashimoto, (1990). Leaf Temperature based on Image Processing, *Measurement Techniques in Plant Science*, pp. 373-385.
- [2] Eguchi H. (1990). Digital Processing of Plant Images Selected by Spectral Characteristics of Reflectance for Evaluation of Growth. In *Measurement Techniques in Plant Science*, edited by Hashimoto Y., Kramer P.J., Nonami H., Strain B.R., pp. 361-372, Ed. Academic Press.
- [3] Eguchi H., Matsu T. , (1978). Computer Control of Plant Growth by Image Processing. *Environment Control in Biology*, Vol. 16, pp 47-55.
- [4] Van Henten E.J (1994). *Greenhouse Climate Management: An Optimal Control Approach*. Tesis Doctoral, Wageningen University, Holanda.
- [5] Van Henten E.J ., Bontsema J. (1995). Non-Destructive Crop Measurement by Image Processing for Crop Growth, *Control Journal of Agricultural Engineering Research*.
- [6] Hack G. (1989). The Use of Image Processing Under Greenhouse Conditions for Growth and Climate Control, *Acta Horticulturae*, Vol. 230, pp. 215-220.
- [7] Otsu N. (1979). A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, Vol. 9, pp. 62-66.
- [8] Gonzalez R.C, Woods R.E, (1992). *Digital Image Processing.*, (1992), Ed. Addison-Wesley Publishing Company.
- [9] Wiederhold, P., (1999). *Introducción al Procesamiento Digital de Imágenes*, Curso de Maestría, Dpto. de Control Automático, CINVESTAV.

- [10] Van Straten G., et al, (1997). Mathematical and Control Applications in Agriculture and Horticulture, Published by International Federation of Automatic Control.
- [11] Goudriaan J., Van Laar H.H., (1994). Modelling Potential Crop Growth Processes, Ed. Kluwer Academic Publishers.
- [12] Hunt R. (1982). Plant Growth Curves: The Functional Approach to Plant Growth Analysis, Ed. Edward Arnold.