

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**  
**FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA**



PONTIFICIA  
**UNIVERSIDAD**  
**CATÓLICA**  
DEL PERÚ

DISEÑO DE UN PROGRAMA DE ORTORECTIFICACIÓN Y  
GEOREFERENCIACIÓN DE IMÁGENES AÉREAS APLICADAS  
A CAMPOS DE CAÑA DE AZÚCAR

Tesis para optar el Título de Ingeniero Electrónico, que presenta el bachiller:

**Gary Javier López de Paz**

ASESOR: Donato Andrés Flores Espinoza

**Lima, febrero del 2012**

## Resumen:

Este documento presenta el diseño de un programa de ortorectificación y georeferenciación de imágenes orientado a la Agricultura de Precisión en la producción de caña de azúcar. La obtención de una imagen ortorectificada y georeferenciada permitirá realizar de manera rápida y eficiente la formación de mosaicos de imágenes, además ser procesada en un software GIS que brinde información útil con respecto a información de los terrenos agrícolas.

El documento está dividido de la siguiente manera:

El Capítulo 1 analiza la situación agrícola con respecto al proceso de producción de caña de azúcar, las propiedades que se pueden obtener, por medio de imágenes, de los cultivos de caña de azúcar y su análisis basado en indicadores. Finalmente se establece el marco problemático que se presenta al adquirir imágenes aéreas.

El Capítulo 2 presenta una introducción a la Agricultura de Precisión y las diversas técnicas que se realizan para el proceso de ortorectificación de imágenes aéreas, así como los algoritmos correspondientes.

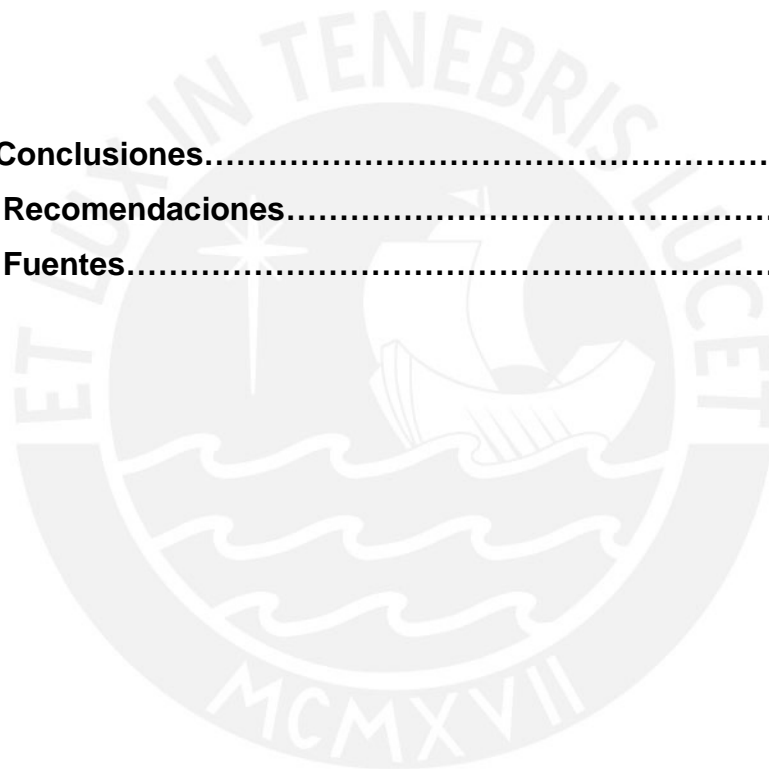
El Capítulo 3 contiene los objetivos de la tesis, el diseño del programa de ortorectificación y georeferenciación, y una breve introducción de la interfaz de usuario que se tendrá. Finalmente analiza las alternativas de diseño y se elige la más eficiente con las herramientas a disposición.

El Capítulo 4 muestra y analiza los resultados del programa, para ello se presenta un conjunto de imágenes, con diferentes características, que serán corregidas geométricamente con respecto a una imagen satelital. La verificación de los resultados se realiza en un software GIS GRASS.

**Índice:**

<b>Capítulo 1: Los cultivos de caña de azúcar y Adquisición de Imágenes.....</b>	<b>2</b>
1.1 Proceso de Producción de caña de azúcar en el Perú.....	2
1.2 Factores Limitantes para la producción de caña de azúcar.....	3
1.3 Propiedades importantes de los campos de cultivo.....	3
1.4 Adquisición de Imágenes aéreas.....	4
<b>Capítulo 2: Rectificación de Imágenes aplicadas a la Agricultura de Precisión.....</b>	<b>7</b>
2.1 Agricultura de Precisión.....	7
2.1.1 Sistemas de Información Geográfica.....	7
2.1.2 Georeferenciación de Imágenes.....	7
2.2 Sensado Remoto en la Agricultura de Precisión.....	8
2.2.1 Imágenes Multiespectrales.....	9
2.3 Métodos de Rectificación de Imágenes.....	10
2.3.1 Selección de Puntos de Control.....	11
2.3.2 Correspondencia entre Puntos de Control.....	11
2.3.3 Función de Transformación.....	12
2.3.4 Transformación en perspectiva.....	17
2.3.5 Re-muestreo de Imágenes.....	19
<b>Capítulo 3: Diseño del software de ortorectificación de Imágenes y de la Interfaz de usuario.....</b>	<b>20</b>
3.1 Objetivos.....	20
3.2 Alternativas de diseño.....	22
3.3 Modelo del Sistema.....	24
3.3.1 GDAL.....	24
3.3.2 OPENCV.....	25
3.3.3 Registro de Imágenes y elección de programa.....	28

3.3.4 Diagrama de Flujo del Programa.....	32
3.3.5 Proceso de Ortorectificación de Imagen.....	33
3.3.6 Proceso de Georeferenciación de Imagen.....	37
3.3.7 Interfaz de Usuario.....	39
3.4 Programa de Ortorectificación y Georeferenciación.....	40
Capítulo 4: Pruebas Finales y comprobación de Resultados.....	47
4.1 Resultados en la etapa de Ortorectificación y Georeferenciación.....	47
Conclusiones.....	54
Recomendaciones.....	55
Fuentes.....	56



## Introducción

La Agricultura en el Perú actualmente hace uso excesivo de recursos como el agua, pesticidas, granos en la siembra y abono, generando un gasto innecesario en el proceso de obtención de alimentos, así como dañar el terreno por un exceso de insumos. Ello se da por un desconocimiento de la zona donde se está realizando el proceso, y no tener una imagen global de este. En muchos países desarrollados se adquiere imágenes digitales de la zona de cultivo, estas pueden ser imágenes provenientes de un satélite o tomadas por cámaras de alta resolución, además cuentan con equipos especializados que brindan cuadros estadísticos de la zona con las imágenes adquiridas.

Como es de conocimiento, la obtención de alimentos en mayor proporción y de una muy buena calidad, generará desarrollo en las zonas aledañas a los terrenos de cultivo, así como satisfacer las necesidades alimenticias en muchos lugares de bajos recursos.

El objetivo del presente trabajo de tesis es diseñar un software que permita visualizar ortorectificar y georeferenciar imágenes aéreas tomadas de cultivos desde aeronaves no tripuladas, específicamente imágenes de caña de azúcar tomadas en la localidad de Paramonga. Estas correcciones son necesarias, porque el móvil que adquiere las imágenes no sigue una línea recta, por el propio movimiento y velocidad de este, ello conlleva a tener imágenes no alineadas, con lo cual la información que ingresemos a los Sistemas de Información Geográfica que nos proporcionará los cuadros estadísticos de la zona de cultivo, será poco precisa y útil para una posterior toma de decisiones con respecto al uso de los recursos necesarios en la etapa de siembra y crecimiento de las plantaciones.

## Capítulo 1. Los cultivos de caña de azúcar y Adquisición de Imágenes.

### 1.1 Proceso de Producción de caña de azúcar en el Perú.

La caña de azúcar en el Perú se cultiva en la costa, sierra y selva. Sin embargo, es en la costa donde se tiene una mayor producción, debido a que presenta adecuadas condiciones climáticas y edáficas, las cuales permiten sembrar y cosechar durante todo el año [1]. Esta es una ventaja competitiva con respecto a Brasil, el principal productor mundial de caña de etanol, que debido a sus condiciones ambientales, no puede desarrollar el cultivo todo el año.

Según la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), el 2008 Perú se ubicaba en el puesto 19 en la producción de caña de azúcar con un total de 9.4 millones de toneladas producidas [2]. A su vez esta ocupa el puesto número 9 con respecto a superficie de cosecha en el año 2009, con un 3.6% del territorio nacional destinado al agro. Ver Tabla1.

**Tabla1:** Superficie cosechada según principales productos 2009

Nº	CULTIVO	SUPERFICIE COSECHADA (Ha)	PART. %	PART ACUM. %
1	Arroz	403,787	19.1%	19.1%
2	Maiz amarillo duro	300,427	14.2%	33.4%
3	Papa	282,130	13.4%	46.7%
4	Maiz amiláceo	213,603	10.1%	56.8%
5	Trigo	157,287	7.5%	64.3%
6	Cebada grano	156,690	7.4%	71.7%
7	Yuca	104,815	5.0%	76.7%
8	Frijol grano seco <sup>2/</sup>	83,453	4.0%	80.6%
9	Caña de azúcar	76,625	3.6%	84.3%
10	Haba grano seco	54,532	2.6%	86.8%
11	Arveja grano seco	50,614	2.4%	89.2%
12	Algodón	39,812	1.9%	91.1%
13	Quinua	34,026	1.6%	92.7%
14	Olluco	27,002	1.3%	94.0%
15	Fijol castilla	20,274	1.0%	95.0%
16	Otros <sup>3/</sup>	105,951	5.0%	100.0%
TOTAL		2,111,028	100.0%	

Fuente: MINAG/OEEE

Actualmente la producción de caña viene creciendo, debido a la fuerte inversión privada, un ejemplo de ello se viene dando en el norte de país donde grupos económicos como Maple y Romero han sembrado gran cantidad de hectáreas de caña de azúcar para la producción de etanol, un combustible renovable y del futuro [3].

## **1.2 Factores Limitantes para la producción de caña de Azúcar**

El proceso de producción de caña de azúcar en el Perú actualmente hace uso excesivo de recursos como el agua, pesticidas, granos en la siembra y abono, generando un gasto innecesario en el proceso de obtención de caña, así como dañar el terreno por un exceso de insumos. Ello se da por un desconocimiento de la zona donde se está realizando el proceso, y no tener una imagen global de éste. En muchos países desarrollados se adquiere imágenes digitales de la zona de cultivo, estas pueden ser imágenes provenientes de un satélite o tomadas por cámaras de alta resolución dispuestas en una aeronave que sobrevuela el terreno de cultivo, además cuentan con equipos especializados que brindan cuadros estadísticos de la zona con las imágenes adquiridas, por medio de software con los Sistemas de Información Geográfica (GIS).

Como es de conocimiento, la obtención de alimentos en mayor proporción y de una muy buena calidad, generará desarrollo en las zonas aledañas a los terrenos de cultivo, así como satisfacer las necesidades alimenticias en muchos lugares de bajos recursos.

## **1.3 Propiedades importantes de los campos de cultivo**

La calidad de la producción depende de las propiedades agrícolas de la vegetación, del suelo y los insumos que se incluyan en el proceso. Es por ello que se requiere tener acceso a cuadros o indicadores que nos muestren como se encuentran distribuidas estas propiedades a lo largo del terreno.

Un análisis basado en imágenes multiespectrales brinda información acerca de la composición de los terrenos y ofrece la posibilidad de almacenar en una base de datos la información obtenida y organizarla de una manera eficiente por medio de los GIS.

Para la caña de azúcar así como otros vegetales podemos mencionar algunos de estos indicadores, los cuales son:

- Factor NDVI: Es un indicador cuantitativo que nos muestra el crecimiento de las plantas y la producción de biomasa a partir de datos satelitales multiespectrales. Su cálculo se da usando la fórmula 1.1

$$NDVI = \frac{NIR-RED}{NIR+RED} \quad (1.1)$$

Donde NIR representa el nivel de reflectancia en la banda infrarroja cercana y RED en la región del rojo visible. Este factor varía entre -1.0 y +1.0 y estima la calidad, cantidad y desarrollo de la vegetación [4].

- Estrés Hídrico: La teledetección térmica permite la detección de estrés en la vegetación por la relación existente entre la temperatura de la planta y su transpiración [5]. El efecto del estrés hídrico en las plantas es la reducción del crecimiento en general, y puede detectarse por medio de imágenes térmicas.

#### 1.4 Adquisición de Imágenes aéreas

En la presente tesis se trabajará con imágenes multiespectrales tomadas a campos de caña de azúcar en la localidad de Paramonga, ubicada a 250km al norte de Lima. Estas imágenes fueron adquiridas mediante un aeromodelo de manera remota. Este cuenta con un sistema de adquisición de imágenes



basado en dos sensores CMOS que permiten captar imágenes en las longitudes de onda del rojo visible (650 nm) y del infrarrojo cercano (850 nm). El módulo encargado de adquirir y procesar las imágenes está compuesto por el computador FITPC2, este cuenta con un dispositivo receptor de datos GPS vía USB y que hace uso del estándar WGS84, un sistema de coordenadas cartográficas mundial [6].

Las imágenes obtenidas por el computador no se encuentran ortorectificadas, es decir, el aeromodelo que adquiere éstas no sigue una línea recta paralela al suelo, por el propio movimiento, peso y velocidad de este, ello conlleva a tener imágenes no alineadas y con ángulos de toma diferentes. Con lo cual la información que se ingresa a los Sistemas de Información Geográfica será poco precisa y útil para una posterior toma de decisiones con respecto al uso de los recursos necesarios en la etapa de siembra y crecimiento de las plantaciones. A su vez estas imágenes deberán ser georeferenciadas, es decir, poseer información en coordenadas geográficas por pixel para saber en qué zona del terreno se tomaron. El aeromodelo en su trayectoria cómo se mencionó presenta diversos grados de libertad que producen la distorsión en la imagen obtenida. Lo explicado se muestra en la figura 1.1.

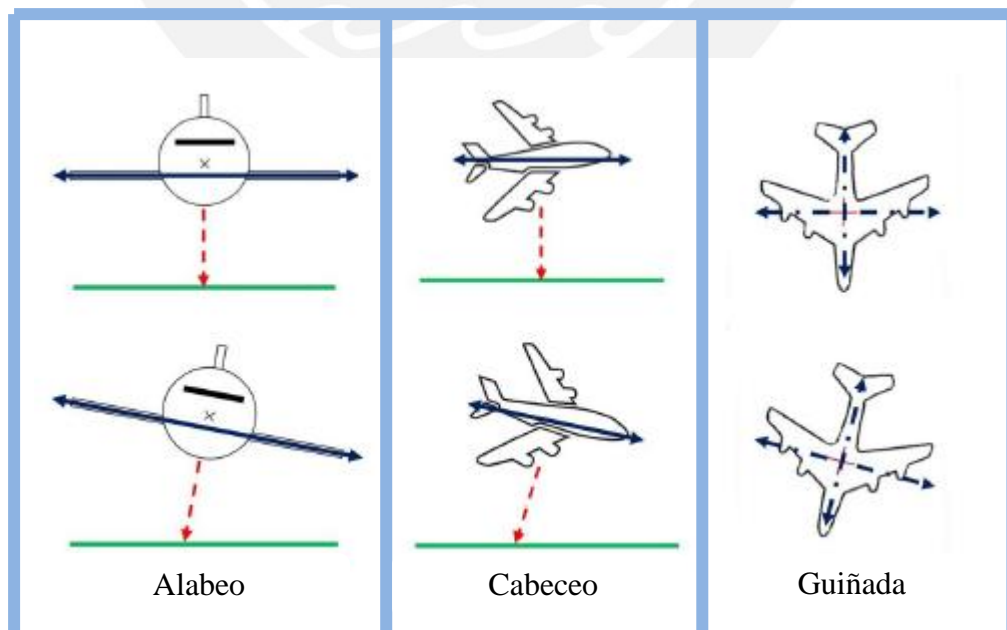
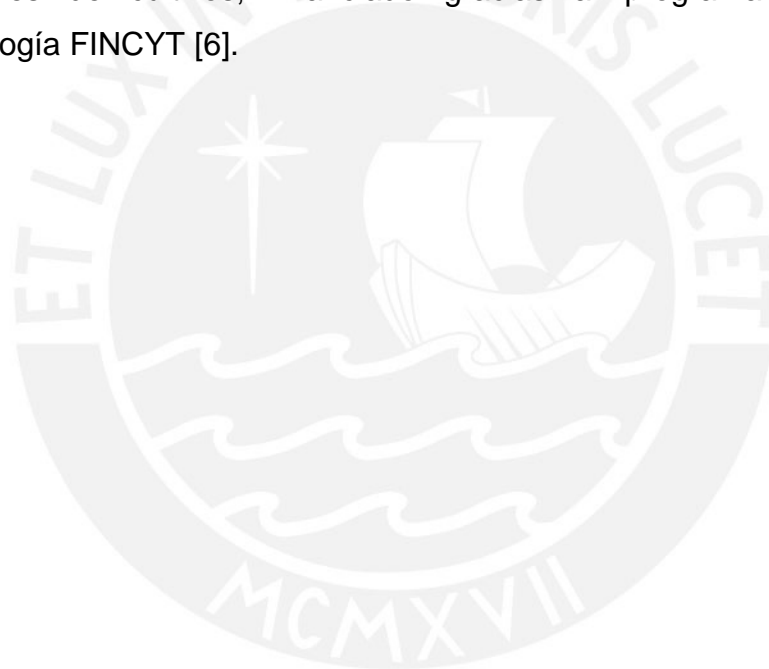


Figura 1.1: Grados de libertad aeromodelo [10].

Mediante este método se podrá hacer uso de todas las imágenes adquiridas y no descartar aquellas que posean un nivel de distorsión que no permita realizar el registro de imágenes mediante la generación de mosaicos. Este proceso se dará de una manera más rápida y eficiente al disponer de imágenes ortorectificadas y georeferenciadas. El Centro Internacional de la Papa (CIP) desarrolla estas metodologías para el análisis de diversos vegetales.

Actualmente existe un proyecto desarrollado en forma conjunta entre la Sección de Electricidad y Electrónica de la Pontificia Universidad Católica del Perú y el CIP para realizar investigación concerniente al análisis de imágenes de cultivos, financiado gracias al programa de Ciencia y Tecnología FINCYT [6].



## **Capítulo 2. Rectificación de Imágenes aplicadas a la Agricultura de Precisión.**

### **2.1 Agricultura de Precisión**

Es la aplicación diferenciada de insumos, atendiendo a las características y necesidades de cada área específica del campo o terreno, mediante el empleo de técnicas geoinformáticas, electrónicas y otras tecnologías (fundamentalmente los GPS y DGPS); con el objetivo de lograr un uso más racional de insumos que reducirían los costos de producción y el impacto ambiental [7].

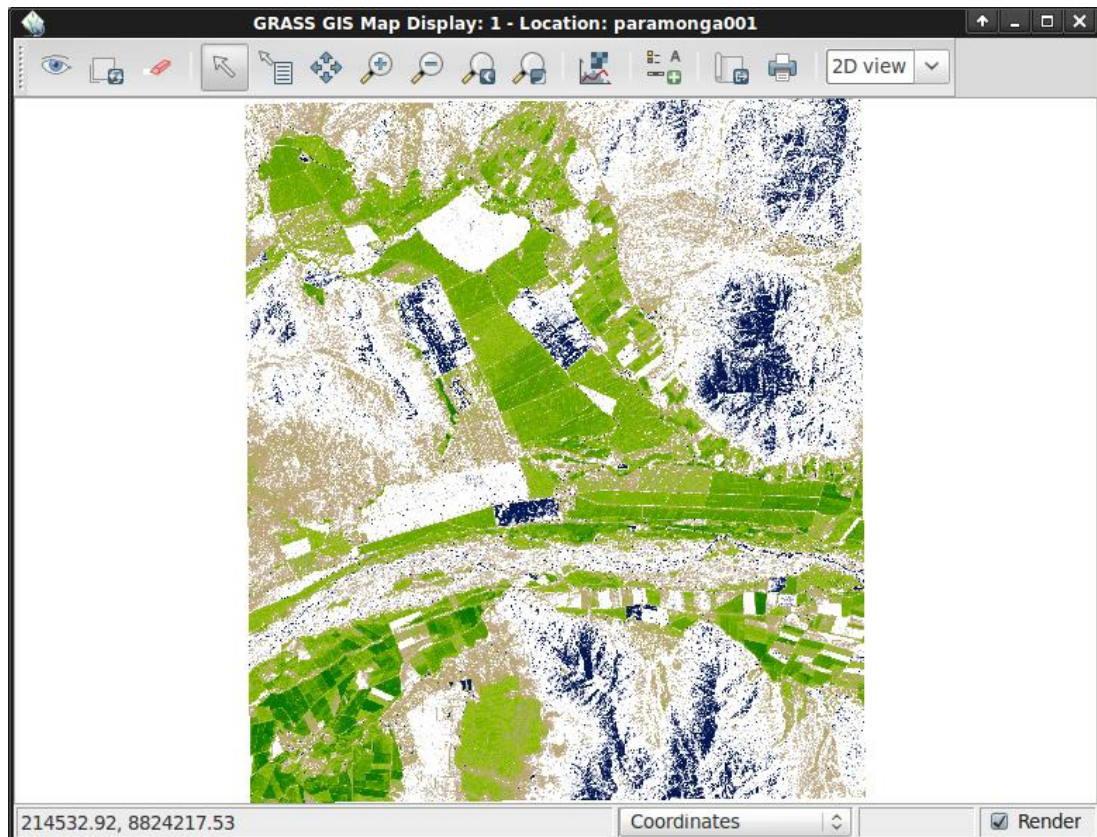
#### **2.1.1 Georeferenciación de Imágenes**

Es el proceso de asignar coordenadas geográficas a los datos de una imagen, para ello se debe transformar esta de un formato estándar a uno de tipo TIF. Este formato permite incluir capas adicionales de información a la imagen y en la etapa de Georeferenciación se añadirá información como la resolución de la imagen (metros/píxeles) en ambos ejes coordenados y las coordenadas geográficas del origen de la imagen a georeferenciar.

#### **2.1.2 Sistemas de Información Geográfica**

Un Sistema de Información Geográfica (GIS) es un sistema informático de herramientas de mapeo y recursos que en conjunto son capaces de gestionar, analizar y mostrar información geográfica [8]. Ello aplicado a la agricultura de precisión permite generar mapas con información agrícola y así poder tener un control sobre los recursos y rendimiento de los cultivos. En la presente tesis se hará uso, para la comprobación de resultados, de GRASS, un software GIS de código abierto que nos permitirá observar si nuestra imagen final con sus coordenadas geográficas se encuentra correctamente ortorectificada y georeferenciada. Un mapa NDVI de una

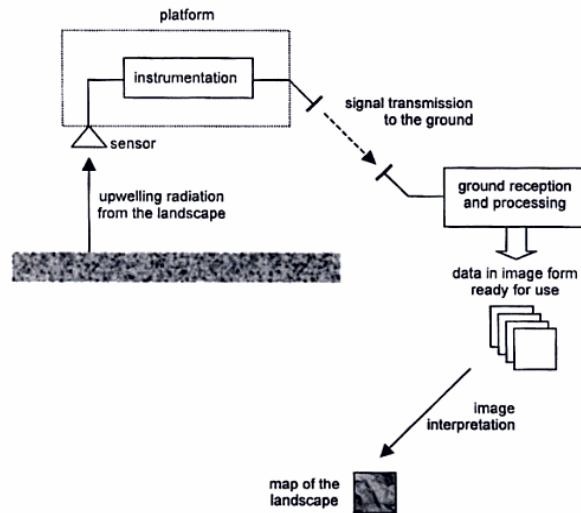
imagen satelital obtenida por medio del GRASS GIS y que será nuestra referencia al momento de ortorectificar las imágenes del avión se muestra en la figura 2.1.



**Figura 2.1:** Mapa NDVI de una imagen satelital en GIS GRASS

## 2.2 Sensado Remoto en la Agricultura de Precisión.

El sensado remoto es la adquisición de datos de un objeto de estudio de una manera remota o sin contacto directo [9]. En la Agricultura se aplica el sensado para conocer la concentración de la vegetación, esta se obtiene afectando los elementos del campo por una fuente energética. La vegetación absorbe determinados niveles de energía en diversas longitudes de onda de acuerdo a su composición. La energía que se refleja es adquirida por sensores multiespectrales [10]. Esta información adquirida es procesada y representada en imágenes digitales monocromas, las cuales serán analizadas y permitirán determinar el estado biológico de la plantación. En la figura 2.2 se muestra el proceso de adquisición de una imagen multiespectral.



**Figura 2.2:** Adquisición de una imagen multispectral [9].

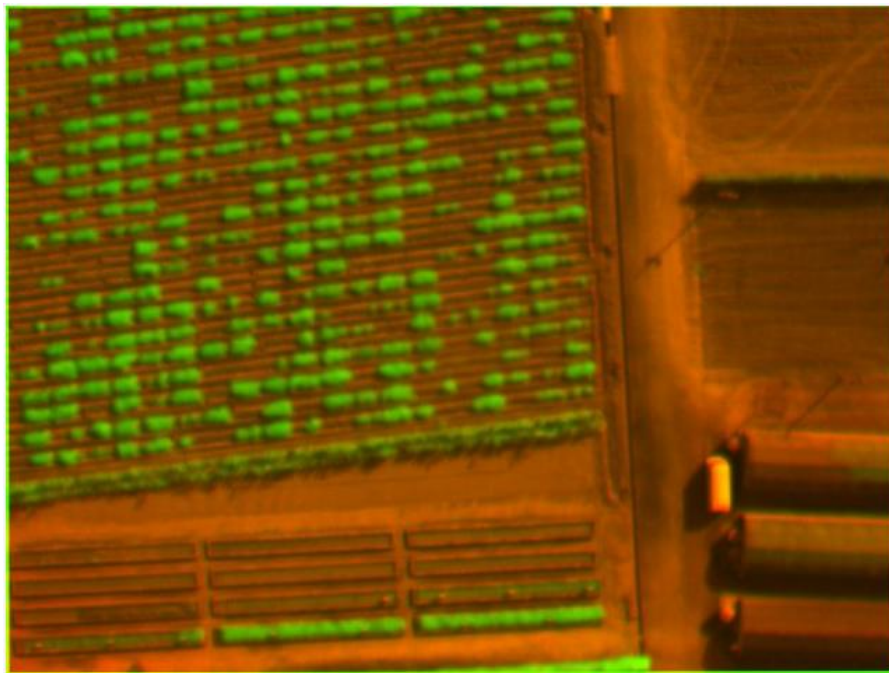
### 2.2.1 Imágenes Multiespectrales

Esta energía electromagnética adquirida por los sensores es plasmada en imágenes de múltiples canales que abarcan distintas bandas de frecuencia, ya sea dentro o fuera del espectro visible [10]. Estas imágenes pueden ser adquiridas por un solo sensor, para ello se hace uso de un prisma que divide el espectro de luz en diferentes regiones, y así se evita el no alineamiento de las mismas. Sin embargo las imágenes adquiridas por la aeronave en el proyecto conjunto realizado por el CIP y la PUCP son captadas por distintos sensores que contienen un filtro para captar cada banda del espectro electromagnético y requieren una etapa previa de alineamiento para su posterior procesamiento. La aeronave empleada se observa en la figura 2.3.



**Figura 2.3:** Aeromodelo usado para la adquisición de imágenes [6].

La siguiente imagen multiespectral en las bandas roja e infrarroja cercana se encuentra en falso color, se denomina así porque la banda infrarroja cercana no se encuentra en la región visible del espectro electromagnético, por ende no puede ser vista por el ser humano, es por ello que se asigna el color verde a esta banda y se forma un falso color. Esta imagen fue adquirida por la aeronave presentada en la figura anterior y representa un campo de camote en el CIP. Ver figura 2.4.



**Figura 2.4:** Imagen Multiespectral tomada en un campo del CIP [6].

### 2.3 Métodos de Rectificación de Imágenes.

La rectificación de imágenes es el proceso de transformar los datos de una imagen de un sistema de cuadrícula a otro usando una transformación geométrica, esta es expresada de una forma polinomial[10]. La ortorectificación de imágenes es un tipo de rectificación que corrige el desplazamiento debido al terreno, para ello se hace uso de Modelos Digitales de Elevación (MDE), sin embargo las imágenes de caña de azúcar adquiridas en Paramonga se encuentran en un terreno plano y de elevaciones despreciables. Se consultó en el Organismo de Formalización

de Propiedad Informal (COFOPRI) en los meses de Febrero y Abril del 2011 acerca de los MDE de la zona de Paramonga y se nos informó que estaban en proceso de elaboración. Es por ello que el proceso de ortorectificación se basará en corregir, como se mencionó anteriormente, el movimiento del sensor en la adquisición de las imágenes.

### **2.3.1 Selección de Puntos de Control.**

Se define punto de control como un elemento que sobresale en una imagen, distinguible e invariante ante posibles cambios de orientación, rotación o escala. Estos pueden ser puntos, líneas o formas geométricas [9]. Aquellos puntos localizados deben ser lo más estable posible y ser suficientemente característicos para una correcta asociación entre puntos encontrados en imágenes diferentes. Existen muchos métodos para poder hallar puntos de control en una imagen de manera automática, basados en diversos algoritmos computacionales ya establecidos y donde se asigna a cada punto de control una posición, una escala y una orientación; sin embargo en la presente tesis estos se determinarán de manera manual. Los motivos de esta elección se explicarán en el capítulo 3.

### **2.3.2 Correspondencia entre puntos de control.**

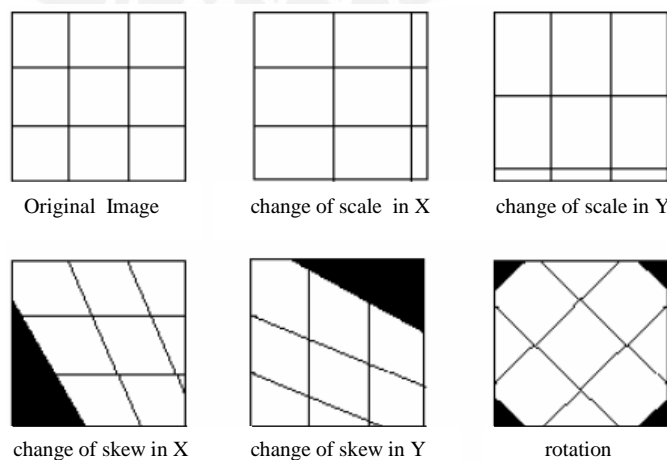
Una etapa posterior a la detección de puntos de control es la creación de descriptores usando histogramas de orientaciones, estos son vectores de características para cada uno de los puntos de control. El número de elementos del vector varía de acuerdo al descriptor utilizado. Entre los descriptores más eficientes con respecto a cambios de escala, orientación e iluminación en las imágenes son los descriptores SIFT [22] y SURF [23]. Este último es mencionado en el capítulo 3 como una posibilidad, para su empleo en la realización del programa de manera automática.

### 2.3.3 Función de Transformación

Las transformaciones modifican las relaciones espaciales entre píxeles en una imagen y son usadas en los registros de imagen, procesos mediante el cual se toma dos imágenes de la misma escena y las alinea de modo que se puedan combinar ya sea para visualización o para una comparación cuantitativa [11]. Los parámetros de transformación son obtenidos por medio de la correspondencia entre los puntos de control mencionados en las imágenes.

Esta transformación o función de transformación permitirá convertir una imagen de un sistema de coordenadas a uno de referencia. Dependiendo de la distorsión de la imagen a corregir el número de puntos de control a utilizar será mayor, con lo cual la función de transformación será más compleja. La función es expresada en forma matricial y su número de elementos (coeficientes) son usados en ecuaciones polinomiales para la conversión de las coordenadas [12]. Entre los distintos tipos de transformación tenemos:

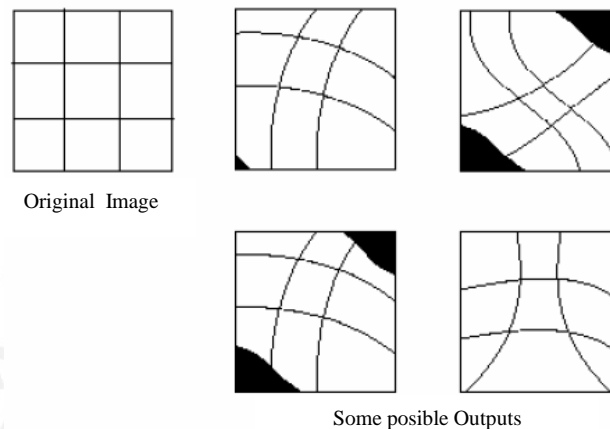
- **Transformación Lineal:** Este tipo de transformación permite realizar cambios de posición, de escala, de orientación y de inclinación. Una característica es que se conserva el paralelismo de las líneas y contornos de la imagen, una transformación de primer orden es un ejemplo de ello. Ver figura 2.5.



**Figura 2.5:** Grados de libertad de una transformación lineal [12].



- Transformación No lineal: Este tipo de transformación permite la corrección de distorsiones no lineales (curvas) en las imágenes. Las transformaciones de segundo orden o mayores pertenecen a este tipo de transformación. Su empleo se da en imágenes muy distorsionadas y de gran extensión. Ver figura 2.6.



**Figura 2.6:** Posibles Grados de libertad en una transformación no lineal [12].

De acuerdo al número de puntos de control tomados se tendrá una matriz de transformación específica, los coeficientes de esta dependerán del orden del polinomio a desarrollar que se tenga. En una ecuación polinomial de primer orden tenemos las siguientes fórmulas:

$$x_0 = c_{11} + c_{12}x + c_{13}y \quad (2.1)$$

$$y_0 = c_{21} + c_{22}x + c_{23}y \quad (2.2)$$

Donde  $c_{11}$ ,  $c_{12}$ ,  $c_{13}$ ,  $c_{21}$ ,  $c_{22}$ ,  $c_{23}$  representan los coeficientes de transformación, las coordenadas  $(x_0, y_0)$  son las coordenadas de salida, es decir de nuestra referencia, por último las coordenadas  $(x, y)$  representan las coordenadas de entrada de la imagen a corregir. Por medio de estas ecuaciones se puede realizar una transformación de coordenadas de la imagen a ortorectificar.

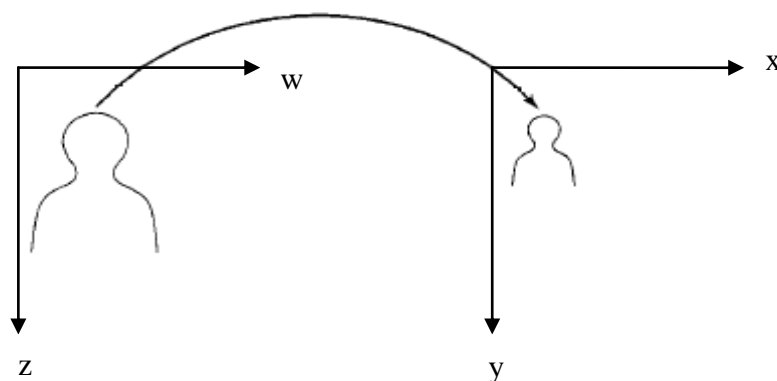
Como en la ecuación tenemos 6 coeficientes a resolver es necesario tener 6 ecuaciones y estas se obtienen por medio de las ecuaciones que se generan al tener 3 puntos de control en ambas imágenes, cada punto de control

entrega dos ecuaciones, una por su coordenada en el eje horizontal y otra por su coordenada en el eje vertical, es por ello que se dispone de 6 ecuaciones y se puede obtener la matriz de transformación. La representación general de la matriz se observa en la siguiente figura:

$$R(x,y) = A \left( \begin{array}{|c|c|c|} \hline c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ \hline c_{21} & c_{22} & c_{23} \\ \hline \end{array} \cdot \begin{array}{|c|} \hline x \\ \hline y \\ \hline 1 \\ \hline \end{array} \right)$$

**Figura 2.7:** Representación matricial de una transformación lineal [12].


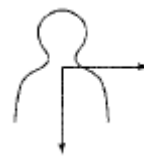
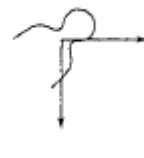


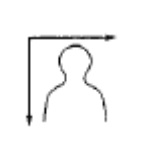
Cómo se mencionó esta matriz consta de 6 coeficientes y de acuerdo al conjunto de transformaciones realizadas a la imagen estos valores cambian. En la figura 2.8 tenemos una imagen en un sistema de coordenadas (w, z) y producto de una distorsión geométrica (un escalamiento para la imagen) se encuentra ahora definida en un sistema de coordenadas (x, y). Para encontrar una matriz de transformación equivalente producto de varias transformaciones afines en una imagen, por ejemplo un escalamiento posterior a una traslación, se deberá multiplicar estas matrices, pero al ser ambas de un orden (2x3) no es posible su multiplicación, es por eso que se añade una fila (0 0 1) en la matriz de transformación para realizar la multiplicación y obtener una matriz equivalente.



**Figura 2.8:** Transformación lineal a una imagen [11].

Las matrices mencionadas se presentan a continuación para cada tipo de transformación. Ver Tabla2.

**Tabla2:** Matrices de Transformación Afín [11].

Tipo	Matriz Afín	Ecuación Coordenadas	Diagrama
Identidad	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{aligned} x &= w \\ y &= z \end{aligned}$	
Escala	$\begin{bmatrix} S_x & 0 & 0 \\ 0 & S_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{aligned} x &= S_x w \\ y &= S_y z \end{aligned}$	
Rotación	$\begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{aligned} x &= w \cos \theta - z \sin \theta \\ y &= w \sin \theta + z \cos \theta \end{aligned}$	
Shear Horizontal	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ \alpha & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{aligned} x &= w + \alpha z \\ y &= z \end{aligned}$	
Shear Vertical	$\begin{bmatrix} 1 & \beta & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{aligned} x &= w \\ y &= w\beta + z \end{aligned}$	
Traslación	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & dx \\ 0 & 1 & dy \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{aligned} x &= w + dx \\ y &= z + dy \end{aligned}$	

Como se mencionó una matriz de transformación de primer orden posee 6 coeficientes, pero una de segundo orden o de orden  $t$  contiene el siguiente número de coeficientes (num) dados por la siguiente fórmula [12]:

$$num = 2 \sum_i^{t+1} i \quad (2.3)$$

Donde:

$i$  = índice de la sumatoria y pertenece al intervalo  $(0 \leq i \leq t+1)$

Se multiplica por dos, considerando los dos conjuntos de coeficientes, uno para la coordenada  $(x)$  y otro para la coordenada  $(y)$ . Las ecuaciones polinómicas para una transformación de orden  $t$  son las siguientes:

$$x_0 = \sum_{i=0}^t \sum_{j=0}^i a_k x^{i-j} y^j \quad (2.4)$$

$$y_0 = \sum_{i=0}^t \sum_{j=0}^i b_k x^{i-j} y^j \quad (2.5)$$

Donde:

$t$  = orden del polinomio

$i, j$  = índices de sumatorias  $(0 \leq i \leq t) \quad (0 \leq j \leq i)$

$a_k$  y  $b_k$  son coeficientes

El subíndice  $k$  en  $a_k$  y  $b_k$  esta representado por:

$$k = \frac{i \cdot i + j}{2} + j \quad (2.6)$$

El proceso de usar transformaciones de segundo orden o mayores se da cuando la imagen a corregir se encuentra muy distorsionada, sin embargo ello no garantiza un éxito en la corrección, debido a que la ecuación trata de dar un ajuste perfecto a los puntos tomados y puede producir efectos negativos en los demás pixeles, con lo cual se puede generar otros tipos de distorsiones en la imagen.

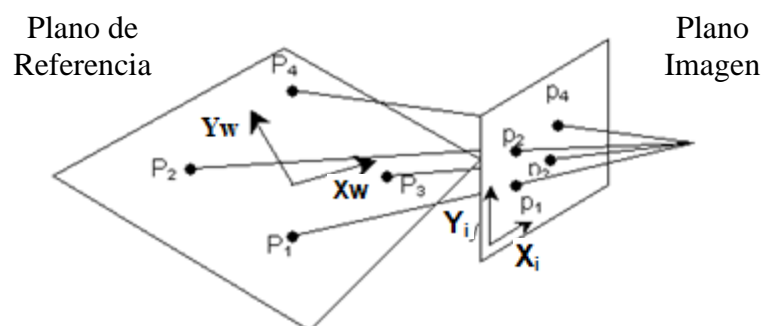
El número mínimo de puntos de control para una transformación de orden ( $t$ ) es la siguiente [12]:

$$\text{Puntos de Control M\u00edimos} = \frac{(t+1)(t+2)}{2} \quad (2.7)$$

Se puede apreciar de la f\u00f3rmula anterior que para una matriz de transformaci\u00f3n de primer orden se requiere como m\u00ednimo de 3 puntos de control, para una de segundo orden se necesitan 6 puntos de control y as\u00ed sucesivamente. Uno de los problemas en la asignaci\u00f3n de puntos de control, concretamente en las im\u00e1genes que disponemos es que estas son relativamente peque\u00f1as y a lo mucho se puede identificar 4 puntos de control con caracter\u00edsticas robustas ante transformaciones.

### 2.3.4 Transformaci\u00f3n en perspectiva.

Dado un conjunto de puntos en un plano de referencia se busca su correspondencia en otro plano denominado imagen, y a su vez conservar sus propiedades invariantes a las proyectividades. A ello se le denomina transformaci\u00f3n de perspectiva [13]. En el siguiente grafico se muestra lo mencionado.



**Figura 2.9:** Planos en una transformaci\u00f3n de perspectiva [14].

Una homografía es descrita mediante una matriz  $H_s$  de orden  $(3 \times 3)$  llamada matriz homográfica y mediante esta matriz se determinarán los puntos en el plano imagen. Se define esta matriz de la siguiente manera:

$$\begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ w \end{bmatrix} = H_s \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ W \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

Donde el Sistema de Coordenadas del sistema de referencia es:  $(X_w, Y_w, W)^T$  con  $Z_w=0$  y el de la imagen es  $(X_i, Y_i, w)^T$

Aplicando un proceso inverso a la ecuación anterior y reemplazando los coeficientes de la matriz homográfica tenemos:

$$\begin{bmatrix} WX_w \\ WY_w \\ W \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & b & c \\ d & e & f \\ g & h & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

Desarrollando estas expresiones y despejando el valor de  $X_w$  e  $Y_w$  tenemos las siguientes ecuaciones [13].

$$X_w = X_i a + Y_i b + c + 0d + 0e + 0f - X_w X_i g - X_w Y_i h \quad (2.10)$$

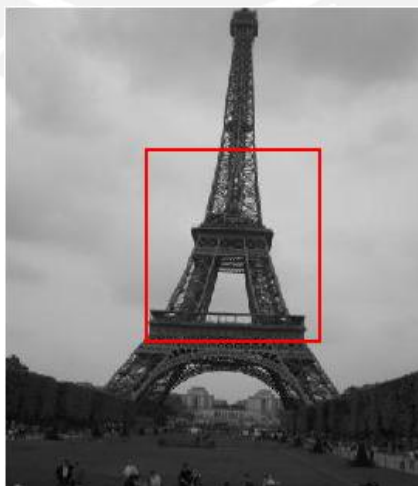
$$Y_w = 0a + 0b + 0c + X_i d + Y_i e + f - Y_w X_i g - Y_w Y_i h \quad (2.11)$$

Tenemos 8 variables desconocidas y  $2(n)$  ecuaciones, sabiendo que existen  $(n)$  correspondencias entre puntos en ambos sistemas de coordenadas. Es por ello que con 4 puntos se resuelve la ecuación y por ende se obtiene los coeficientes  $(a, b, c, d, e, f, g, h)$ . Al tener más puntos la matriz  $H_s$  estará sobre determinada y podrá ser calculada mediante un esquema sobre determinado como la descomposición en valores singulares (SVD) [14].

### 2.3.5 Re-muestreo de Imágenes.

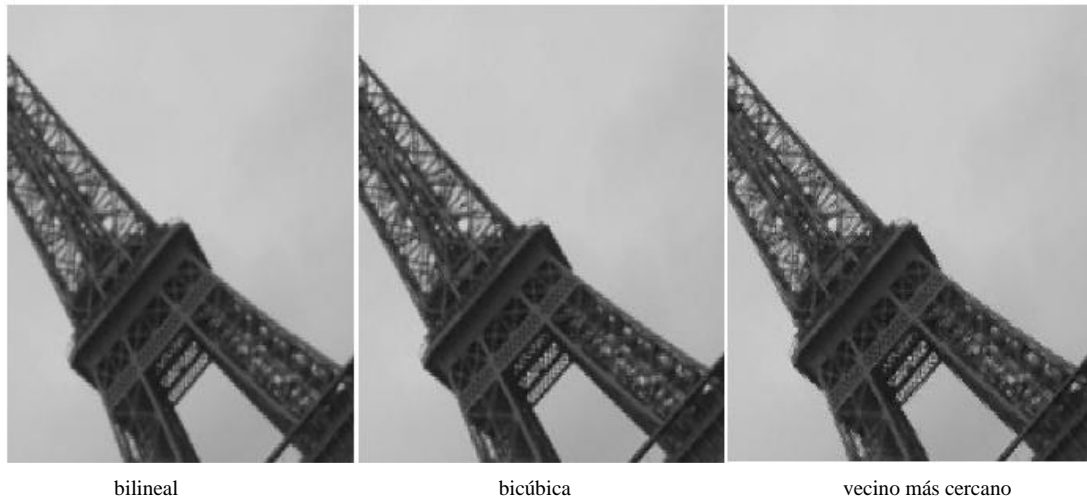
Se representa una imagen en un sistema de coordenadas nuevo, para ello se requiere de las correspondencias entre puntos halladas previamente (función de transformación) .Este proceso se denomina re muestreo de imagen y debido a que la relación entre pixel y pixel no es descrita como una relación entre los sistemas de coordenadas, se realiza una interpolación.

La ubicación de los píxeles en un nuevo sistema de coordenadas no corresponde necesariamente a ubicaciones enteras, es decir el nuevo pixel hallado podría tener una ubicación real (número de punto flotante), es por ello que se aplica métodos de interpolación numérica para valores de intensidad que se asignarán a las nuevas posiciones en el plano imagen [14] Los métodos de interpolación son definidos de acuerdo a la cantidad de puntos tomados en cuenta para la asignación de intensidades [9]. Dentro de los tipos de interpolación más usados tenemos: vecino más cercano (nearest neighbor) donde se hace uso de un pixel, interpolación bilineal (bilinear interpolation) se hace uso de cuatro píxeles, convolución cubica (cubic convolution) se hace uso de 16 píxeles [14]. En la figura 2.10 se tiene una imagen a la cual se aplicará una transformación afín (rotación 45 grados), y se observará los tipos de interpolación mencionados.



**Figura 2.10** [14]: Imagen modelo a la cual se le realizará una transformación afín

En la figura 2.11 se muestran tres imágenes generadas al aplicar distintos tipos de interpolación hacia la imagen de la figura 2.13.



**Figura 2.11** [14]: Resultados al aplicar diferentes tipos de interpolación

Se observa que el tipo de interpolación del vecino más cercano presenta más distorsión en los bordes a diferencia de los otros tipos de interpolación, que presentan distorsiones menos pronunciadas, pero con un coste computacional alto.



## Capítulo 3: Diseño del software de ortorectificación de Imágenes y de la Interfaz de usuario

### 3.1 Objetivos:

#### 3.1.1 Objetivo General:

Diseñar un software que permita ortorectificar y georeferenciar imágenes aéreas tomadas a terrenos agrícolas y así contribuir al desarrollo de la Agricultura de Precisión en el Perú.

#### 3.1.2 Objetivos Específicos:

- Diseñar una interfaz gráfica al usuario que sea de fácil acceso y de fácil entendimiento.
- Implementar el algoritmo de Georeferenciación de Imágenes.
- Hacer uso de herramientas de código libre, tales como el sistema operativo, el lenguaje de programación y las librerías.
- Realizar ortorectificaciones usando más de tres puntos de control y analizar los resultados.
- Ingresar las imágenes ortorectificadas y georeferenciadas al software GIS GRASS para su posterior procesamiento.

### 3.2 Alternativas de diseño.

Se tiene como objetivo principal ortorectificar imágenes multispectrales tomadas desde una aeronave, para ello se requiere tener una referencia que nos indique cual es la correcta posición u orientación de nuestra imagen. En la búsqueda de esta referencia se tuvo dos alternativas. Una de ellas fue un mapa catastral de la zona, éste proporciona información acerca del plano del terreno, y sus límites. La empresa propietaria de las hectáreas de caña de azúcar Agro Industrial Paramonga poseía un mapa de datos vectoriales que contenía algunas referencias tales como pistas y algunas intersecciones, sin embargo muchos datos encontrados con respecto a ubicación geográfica no eran los adecuados, debido posiblemente a una mala medición con los dispositivos GPS o una creación del mapa catastral con mucho error. Esto se pudo comprobar porque internamente el grupo de investigación tenía una base de datos de coordenadas geográfica de algunos puntos específicos y por medio de comparación se llegó a la conclusión de que los mapas catastrales de la empresa tenían un error en las mediciones.

Es por ello que se decidió ir a COFOPRI (Organismo de la Formalización de la Propiedad Informal) para adquirir un mapa catastral de la zona. Este organismo proporciona al público en general mapas catastrales y topográficos. El mapa catastral mencionado se muestra en la figura 3.1.

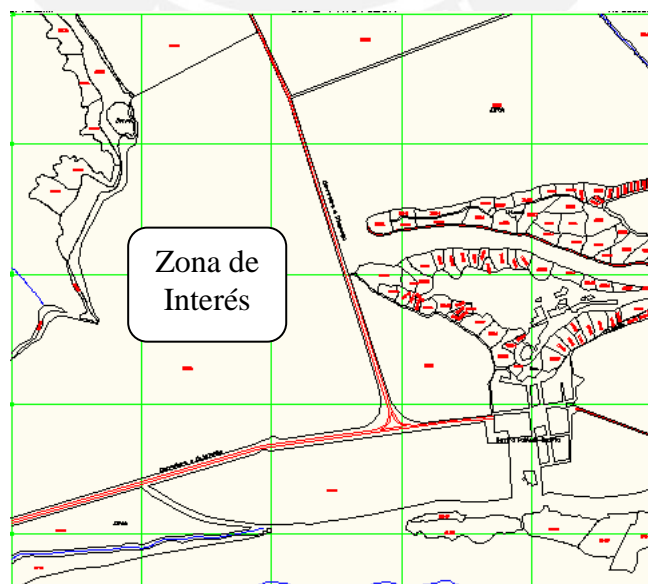


Figura 3.1: Mapa catastral adquirido en COFOPRI

Se pensó que este mapa poseía referencias tales como pistas e intersecciones claras dentro del terreno donde se tomaron las imágenes multiespectrales, sin embargo sólo presentaba información acerca de la limitación de la propiedad. El mapa catastral que poseía Agro Industrial Paramonga del terreno (ubicado en el kilometro 250 de la Panamericana Norte) fue hecho por la propia empresa, es por ello que presentaba más detalles que el mapa adquirido en COFOPRI.

La segunda alternativa de referencia fue la imagen satelital de la zona de Paramonga adquirida por la PUCP en Octubre del 2010. Esta imagen fue obtenida por un sensor multiespectral ubicado en el satélite QuickBird a 450 km de altura, además posee 4 bandas del espectro electromagnético (Rojo, Verde, Azul e Infrarrojo cercano), y se encuentra en un formato de imagen Geotiff, que posee datos geospaciales. Su costo fue de 2500 dólares y se compró con el fin de comparar los resultados que ofrecía con respecto a las imágenes adquiridas por la aeronave. Sin embargo esta imagen fue tomada el 30 de Octubre del 2010 y las imágenes del avión fueron adquiridas el 07 de Noviembre de ese mismo año, en ese intervalo de tiempo hubo ligeros cambios en las condiciones del terreno, las cuales no afectarán a la realización del programa de ortorectificación, porque este será realizado de manera manual.

Hallada la referencia se procedió a buscar un software que fuera capaz de obtener los datos geográficos y mostrar la imagen satelital de una manera rápida. En esa búsqueda se realizó pruebas en Matlab, un software que permite realizar procesamiento digital de imágenes y según información al usuario permite leer formatos Geotiff, sin embargo al intentar leer un archivo de este tipo se apreciaba una lenta respuesta del programa y no se logró apreciar la imagen satelital. Debido a ello se siguió buscando alternativas y se encontró una manera eficiente y rápida de poder acceder a los datos geospaciales de la imagen y mostrarla. Esto fue posible gracias a las librerías de código libre, a comparación del uso de Matlab que es un programa no gratuito, GDAL [17] y OPENCV [18]. Estas se encuentran realizadas en un lenguaje de programación C, el cual es muy difundido a nivel mundial.

### 3.3 Modelo del Sistema

Conociendo las herramientas a usar para la creación del programa, se procede a realizar un diseño del mismo. Como se explicó anteriormente se utilizó la librería GDAL para la lectura de los datos geoespaciales de la imagen y su definición se muestra a continuación.

#### 3.3.1 GDAL

Es una librería para lectura y escritura de datos raster geoespaciales, soporta varios formatos y es de código libre. Además brinda una variedad de utilidades en línea de comando para la interpretación y procesamiento de datos geoespaciales [17].

Se procede a su instalación en el Sistema Operativo (S.O), esta dependerá del sistema operativo a usar, en este caso hemos empleado tanto el S.O Linux Xubuntu 10.04 como el S.O Windows 7 Ultimate. Luego con un editor de texto con características básicas de entorno de desarrollo integrado (IDE), en el caso de Linux se usó Geany, se empezó a escribir las líneas de código del programa. Para el caso de Windows se usó el Dev-C++, un IDE para programar en lenguaje C y C++.

Dentro de los beneficios que ofrece GDAL se encuentra la lectura en una banda del espectro de una imagen Geotiff, así como tener los datos de una porción del terreno por medio de límites. Como esta será una referencia, necesitamos poder observar detalles en la misma, tales como esquinas, pistas, surcos; para ello se requiere mostrarla. Aquí se aprovechó que GDAL se encuentra realizada en lenguaje C, entonces se buscó una librería en este lenguaje que permita mostrar esos datos obtenidos usando GDAL. En esa búsqueda se optó por OPENCV y su definición se muestra a continuación.

### 3.3.2 OPENCV

Es una librería de visión por computadora, de código libre desarrollada por Intel. Se encuentra escrita en lenguaje C y C++ y puede ser usada tanto en los S.O Linux, Windows y Mac. Contiene más de 500 funciones que abarcan muchas áreas de la visión por computadora, tales como reconocimiento de objetos, imágenes médicas, calibración de cámaras y robótica [18].

Esta librería, al igual que GDAL, se instala en el Sistema Operativo, y su proceso de instalación varía de acuerdo al S.O a utilizar. En las siguientes líneas se trabajará sólo en el S.O Linux Ubuntu 10.04. Esto debido a que el GIS GRASS se encuentra instalado en Linux y en este software GIS realizaremos las pruebas y verificaciones.

OPENCV permite mostrar los datos obtenidos por GDAL, para ello se hace uso de algunas funciones. Entre las más importantes se encuentran la de conversión de escala, la de creación de ventana y la de visualización de la imagen. La primera (`cvConvertScale`) permite convertir un arreglo en otro por medio de una transformación lineal, sabiendo que una imagen es un arreglo donde se almacena intensidades de luz para cada pixel, es necesario usar esta función debido a que una imagen satelital utiliza niveles de intensidad en el rango de 16 bits, es decir, de valores desde 0 hasta 65535 y OPENCV permite guardar imágenes en formato BMP (archivo de mapa de bits), sólo en el rango de 8 bits, es por ello que se realiza un escalamiento en la imagen; un nivel de intensidad de 65535 ahora sería uno de 255. El objetivo de guardarla es no tener que leer la imagen satelital en formato Geotiff cada vez que se desee ortorectificar y georeferenciar otra imagen, es mucho más eficiente leerla en formato BMP, debido a que se consume menos recursos del CPU; además se puede almacenar diferentes partes del terreno en imágenes BMP y solo bastaría con indicar el nombre para una referencia. La creación de ventana (`cvNamedWindow`) es una función que permite crear un espacio para visualizar la imagen en una resolución de pantalla especificada por el usuario (`cvResizeWindow`), esta será de mucha utilidad cuando usemos la función “captura recuadro” o “zoom” que se creará posteriormente.

Finalmente la función muestra imagen (cvShowImage) permite visualizarla tanto en escala de grises como en colores (RGB).

Las siguientes figuras corresponden a una imagen satelital mostrada en dos bandas del espectro (rojo visible e infrarrojo cercana) haciendo uso de las librerías GDAL y OPENCV. Analizaremos estas dos bandas, porque son las que mayor información proporcionan con respecto al estado vegetativo de los cultivos. Por ejemplo una vegetación “adulta” tendrá mayor reflectancia en la banda infrarrojo cercana, lo contrario ocurre cuando se analiza en la banda roja. Asimismo un cultivo “joven” presenta menor reflectancia en la banda infrarrojo cercana. Esta información brindada es útil para determinar qué zonas por ejemplo requieren mayor cantidad de insumos.



**Figura 3.2:** Imagen Satelital en banda roja

En la figura 3.2 se puede apreciar que la parte izquierda de la imagen es en su mayoría cultivo “joven” y el de la derecha es cultivo “adulto”, debido a que un cultivo joven tiene mayor reflectancia en la banda roja.

En la figura 3.3 se muestra la imagen satelital en la banda infrarroja cercana.



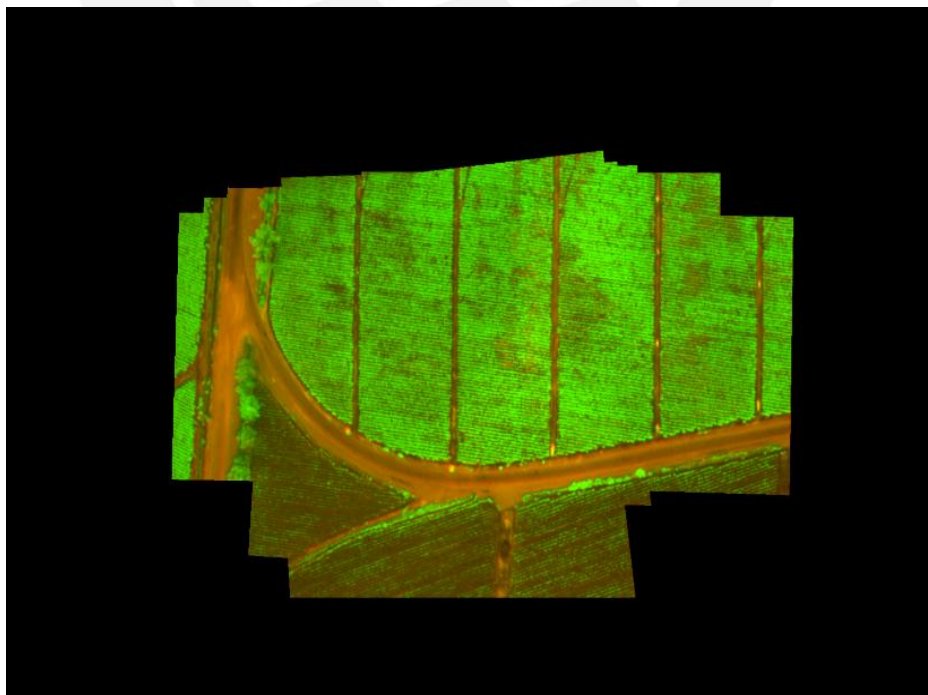
**Figura 3.3:** Imagen Satelital en banda infrarroja cercana

Aquí se puede apreciar lo contrario a lo observado en la figura 3.2. Esta imagen satelital fue adquirida el 30 de Octubre del 2010 y el análisis basado en edad del cultivo, mostrado anteriormente, solo es útil en el momento de

su adquisición. Es por ello que se requiere tomar imágenes multiespectrales desde un avión y realizar el mismo análisis que se hizo con la imagen satelital, en cualquier fecha. Para efectos del programa de ortorectificación se usará como referencia la imagen satelital en banda infrarroja, debido a que presenta una mayor definición como se aprecia en la figura 3.3. Además existe mayor cantidad de detalles en la zona de cultivos “adultos” y estos se pueden apreciar mejor en la imagen satelital en banda infrarroja cercana.

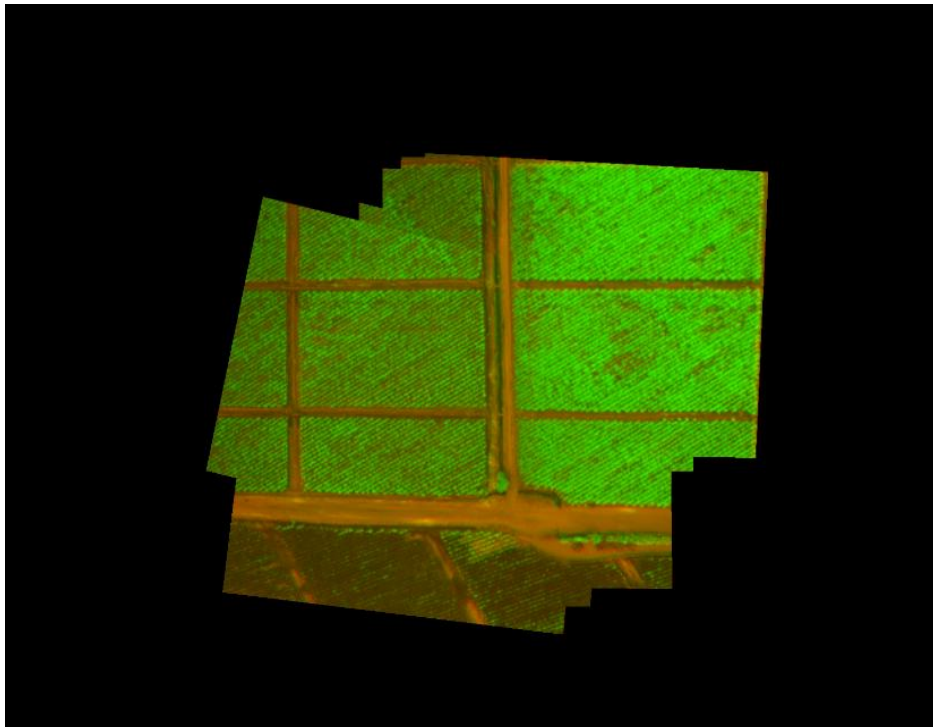
### 3.3.3 Registro de Imágenes y elección de programa.

Obtenida una imagen de referencia se procede a analizar las imágenes adquiridas por la aeronave. Estas son presentadas en dos bandas del espectro, rojo visible e infrarroja cercana, debido a que estas proporcionan mayor cantidad de información vegetativa. Como se mencionó en el capítulo 1 estas imágenes se muestran en falso color, una técnica computacional para visualizarla en colores. Las siguientes figuras representan registros de imágenes que deberán ser ortorectificadas y georeferenciadas para su posterior procesamiento.



**Figura 3.4:** Registro de Imágenes Multiespectrales





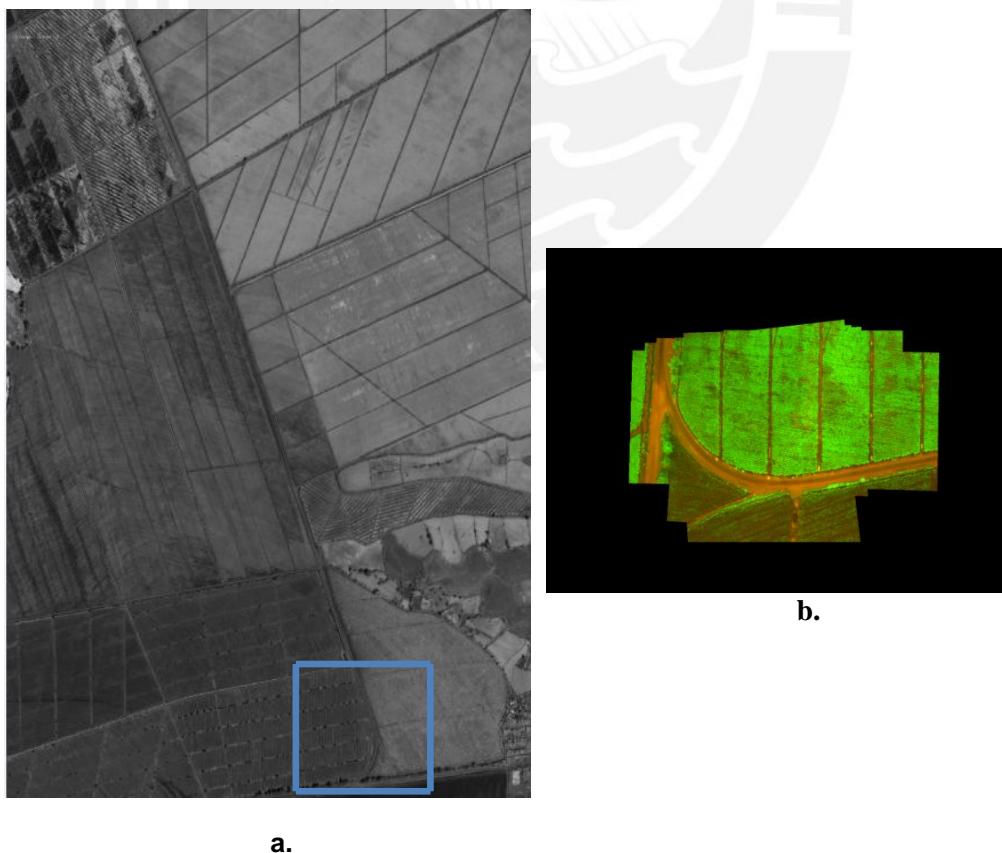
**Figura 3.5:** Registro de Imágenes Multiespectrales

Las imágenes que se mostraron en las figuras anteriores, son registros de imágenes, es decir fueron formadas por la unión de varias imágenes pequeñas y consecutivas a través de un algoritmo que fue parte de una tesis por sustentar. Este algoritmo hace uso del descriptor SURF, que se mencionó en el capítulo 2 como alternativa para realizar el programa de manera automática. Este algoritmo hace uso del determinante de la matriz hessiana, para la localización y escala de los puntos de interés [19]. Estos puntos son invariantes a cambios de escala, orientación e iluminación en la imagen y quedan descritos por medio de un descriptor. Este es un vector que almacena las características de cada punto encontrado, en el caso del descriptor SURF este consta de 64 elementos. Luego se procede a encontrar una correspondencia entre las imágenes, un valor que represente el grado de similitud de las mismas (matching).

Esta correspondencia se lleva a cabo mediante el cálculo de la distancia euclídea entre los vectores de características pertenecientes a diferentes puntos [19]. Para este proceso el algoritmo selecciona para un punto dado

en una imagen, dos puntos en la otra(los mejores) de tal manera que por medio de una comparación de distancias (usando el concepto de distancia mínima cuadrada) se elige al mejor de ellos, esta técnica se denomina “el vecino más próximo”. Finalmente se obtiene una correspondencia entre puntos y el éxito del descriptor dependerá de cuantos puntos comunes fueron encontrados y sobretodo de no haber realizado una mala correspondencia entre estos. Este descriptor fue usado para unir imágenes tomadas por la aeronave.

Como se mencionó en el capítulo 2, una de las alternativas era realizar el programa de manera automática usando el descriptor SURF, sin embargo al aplicarlo en el caso de la imagen obtenida desde una aeronave con la imagen satelital se encontraban muchos puntos comunes en las imágenes, pero la correspondencia era incorrecta. Se aplicó este algoritmo, debido a que este presenta los mejores resultados y que se encuentra en numerosos proyectos relacionados a la correspondencia de imágenes. En la siguiente figura se hará un análisis al respecto.



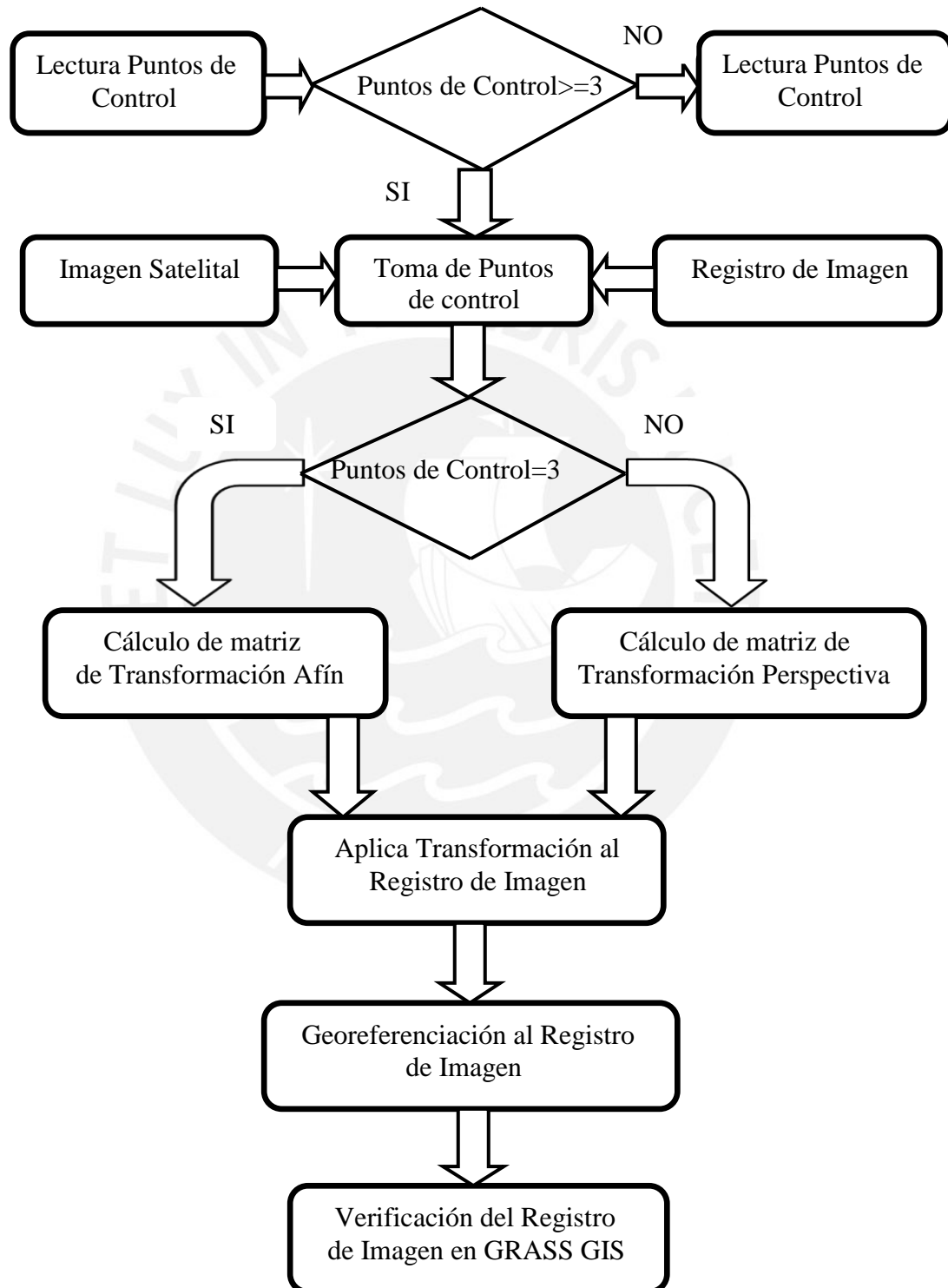
**Figura 3.6:** Imagen satelital y un registro de imágenes

En la figura 3.6 podemos apreciar que existen muchas posibilidades para el registro de imágenes con respecto a encontrar una correspondencia dentro de la imagen satelital. Sé eligió esta imagen sabiendo que posee curvas y algunas líneas paralelas, sin embargo no se pudo encontrar puntos comunes correctos.

El algoritmo SURF aplicado para la generación de registros, fue eficiente al encontrar correspondencias entre imágenes adquiridas por un mismo sensor. En este caso la imagen satelital fue adquirida por un sensor multiespectral ubicado en un satélite a 450 km de altura, y el registro fue generado con imágenes adquiridas desde una aeronave que sobrevoló a una altura de aproximadamente 200 metros. Es decir en la imagen del avión se tiene una mayor resolución, cambios de iluminación, orientación y cambios originados por el sensor. Otro detalle a tener en cuenta, el cual es fundamental, es que esta imagen satelital solo podrá ser usada de manera eficiente, para el proceso de ortorectificación y georeferenciación, con imágenes que fueron adquiridas por la aeronave un día cercano a la toma de la imagen satelital. Esto debido a que el agricultor días posteriores puede realizar la cosecha, colocar objetos en el terreno, sembrar nuevos cultivos. Esto produciría ligeros o grandes cambios en la escena, en el peor de los casos las imágenes serán muy diferentes y se encontrarán pocos puntos comunes. Finalmente el coste computacional de una búsqueda de un registro como el mostrado en la figura 3.6b en una imagen satelital como la mostrada en la figura 3.6a es altísimo, con el riesgo de realizar una correspondencia errada, pero es una posibilidad. Es por ello que se decidió por un programa que recurra a entradas ingresadas de manera manual (puntos de control) por un usuario, este de manera visual detectará aquellos puntos con características fuertes y por medio de un algoritmo realizado en el programa se entregue una imagen ortorectificada y georeferenciada. En muchos casos sólo bastará indicar 3 puntos de control en ambas imágenes para realizar la ortorectificación.

### 3.3.4 Diagrama de Flujo del Programa

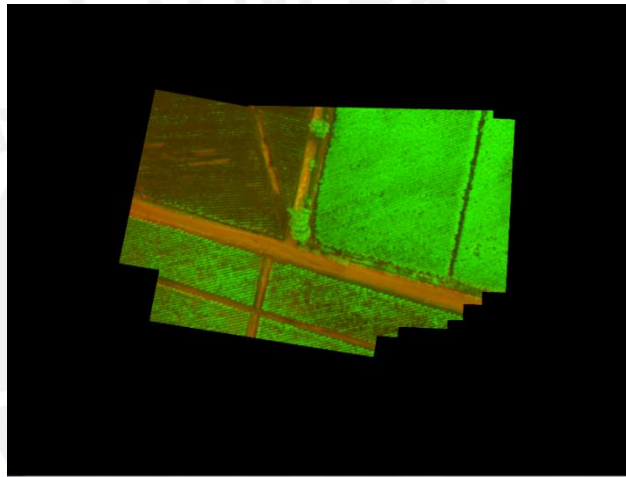
Conocido el método a emplear para la realización del programa se procede a realizar el diagrama de flujo del mismo.



**Figura 3.7:** Diagrama de Flujo del Programa de Ortorectificación y Georeferenciación.

En el diagrama de flujo mostrado el usuario ingresará tres o más puntos de control, el programa no ejecuta el algoritmo en caso no se cumpla esta condición. Al ingresar tres puntos se aplica una transformación Afín, explicada en el capítulo 2, y al ingresar 4, 5 o más puntos de control se aplicará una transformación de perspectiva.

OPENCV brinda herramientas necesarias para desarrollar estos algoritmos, para ello se recurrirá a diversas funciones de cálculo de matrices de transformación, re-muestreo de imágenes, manejo de ventanas y recorte de imágenes, esto último debido a que la imagen que se genera en el registro posee mucha información nula en sus bordes (color negro). Ver figura 3.8



**Figura 3.8:** Registro de Imagen con información nula en sus extremos.

El proceso de recorte se dará luego del proceso de ortorectificación de imagen (Etapa de Transformación de Registro en el diagrama de flujo) y este entregará una imagen con poca información nula en sus extremos, ortorectificada y lista para ser georeferenciada.

### 3.3.5 Proceso de Ortorectificación de Imagen.

El proceso de Ortorectificación de imágenes hará uso de muchas funciones de corrección geométrica que brinda OPENCV. Para ello se pedirá previamente la cantidad de puntos de control deseados. Según el diagrama de flujo mostrado en la sección 3.3.4 este número indicará qué función emplearemos.

Inicialmente debemos mostrar la imágenes, para ello se hará uso de las funciones de opencv (cvNamedWindow) que permitirá crear una ventana de desarrollo para visualizar la imagen, (cvResizeWindow) que permitirá poder manejar la resolución en pantalla y se pueda tener un mayor orden visual al momento de asignar puntos de control, y finalmente (cvShowImage) para mostrar la imagen final, esta puede encontrarse tanto en escala de grises como en colores RGB (RED, GREEN, BLUE). Estos puntos deben tener una señalización, es decir, al momento de la toma se muestre por medio de círculos las posiciones donde fueron asignados y tener una ayuda memoria. Para ello se creó una función que dibuja círculos sobre una imagen, y almacena internamente esta nueva imagen para una posterior toma de puntos, así se tiene sobre ella todos los puntos mostrados en círculos blancos. En realidad todo es un proceso conjunto, debido a que al hacer uso de una interfaz de usuario GTK explicada posteriormente, tomar solo los puntos deseados y poder hacer uso de una función reset de puntos tomados se tiene funciones llamadas constantemente. El proceso mencionado se describe en el siguiente pseudocódigo.

////////////////////////////////////Función Para tomar Puntos de Control////////////////////////////////////

**Inicio:**

**Variables:** ImagenSatelital, RegistroImagen, puntos\_control\_auxiliar=0  
imagen\_nueva,puntos de control

**Funciones:** Muestra\_Imagen, Almaceno,TomaPuntosControl,  
DibujaPuntoControl

////////////////////////////////////

Leer (ImagenSatelital,RegistroImagen)

Imprimir (“¿Cuántos Puntos de Control desea tomar?”)

Leer puntos de control

// AQUÍ SENSAMOS LAS SEÑALES PROVENIENTES DE LA INTERFAZ//

Muestra\_Imagen(ImagenSatelital)

Almaceno(ImagenSatelital)

**Hacer**

TomaPuntosControl(Satelital)

imagen\_nueva=DibujaPuntoControl(ImagenSatelital)

ImagenSatelital=imagen\_nueva

incrementa puntos\_control\_auxiliar

**Mientras** (puntos\_control\_auxiliar<puntos de control)

## Fin

El pseudocódigo mostrado se realiza de igual manera para el caso del registro de imagen. Dentro de la función TomaPuntosControl se encuentra la función de reset de puntos para ello hacemos uso de la función Almaceno y volvemos a realizar el proceso. Como expliqué anteriormente la prioridad la tiene la señal que se obtenga en la interfaz de usuario, es decir, al presionar la casilla ImagenSatelital se realizará el pseudocódigo mostrado para el caso de la imagen satelital. De igual forma para el caso del registro de imagen.

Una vez almacenadas las coordenadas pixeles en ambas imágenes se procede a calcular las matrices de transformación. Tal y como se mencionó en el capítulo 2, esta tesis trabajará con dos tipos de transformación, la Afín y la Perspectiva. Si elegimos una transformación Afín se usará la función de OPENCV (cvGetAffineTransform) la cual proporcionará una matriz de transformación (2x3), para ello previamente debimos almacenar las coordenadas pixeles en las dos imágenes, la satelital y el registro, haciendo uso de una estructura cvPoint2D32f, la cual almacena coordenadas (x, y) en punto flotante. Estas se obtendrán haciendo uso de la función que llama a eventos del mouse (cvSetMouseCallback), para nuestro caso usaremos dos eventos, uno(click izquierdo) para la asignación de puntos de control y otro(click derecho) para la función zoom que se creará para tener una mejor visión de la zona en la imagen satelital. Esta matriz de transformación será hallada en una función dentro del programa denominada halla\_FT, la cual resolverá un sistema de ecuaciones formado con las coordenadas pixeles en ambas imágenes y proporcionará los coeficientes de transformación, mayor detalle se encuentra en el capítulo 2. Esta función halla\_FT también proporcionará matrices de perspectiva (3x3) en caso se elija al inicio del programa más de tres puntos de control. Aquí se aplicará una transformación de perspectiva entre dos planos. OPENCV brinda funciones como cvGetPerspectiveTransform, la cual en base a cuatro puntos

transforma un cuadrilátero convexo en otro, en base a proyecciones. Para el caso de elegir mayor cantidad de puntos se usará la función cvFindHomography, la cual calcula la matriz de transformación perspectiva para 4 puntos o más, haciendo uso de métodos. EL pseudocódigo de esta función se muestra a continuación.

//////////Función Para Hallar Matriz de Transformación//////////

**Inicio:**

**Variables:** puntos de control, matriz\_transformacion,

**Funciones:** Calcula\_Transformacion\_Afin,

Calcula\_Transformacion\_Perspectiva

Si (puntos de control=3)

matriz\_transformacion=Calcula\_Transformacion\_Afin

Si (puntos de control=4)

matriz\_transformacion=Calcula\_Transformacion\_Perspectiva

Sino

matriz\_transformacion=Calcula\_Transformacion\_Perspectiva\_Homografica

**Retorna** matriz\_transformacion

**Fin**

Una vez hallada la matriz de transformación se procede su aplicación al registro de imagen. Para ello se hace uso de la función Aplica\_Transformación que utiliza la función de Opencv cvWarpAffine, la cual aplica la matriz de transformación afín (tres puntos de control) hallada a la imagen y la convierte haciendo uso de métodos de interpolación mencionados en el capítulo 2. Para el caso de tener 4 o más puntos se utilizará la función cvWarpPerspective. Por último dentro de Aplica\_Transformación se llamará a una de recorte, la cual brindará una con poca información nula en sus bordes a diferencia del registro original. El pseudocódigo de esta función se presenta a continuación.



//Función Para Aplicar Transformación//

**Inicio:**

**Variables:** puntos de control, RegistroImagen, ImagenOrtorectificada

Si (puntos de control=3)

ImagenOrtorectificada =AplicaTransformacionAfin(RegistrodelImagen)

Si no

ImagenOrtorectificada =AplicaTransformacion

Perspectiva(RegistrodelImagen)

ImagenOrtorectificada=Recorte(ImagenOrtorectificada)

**Fin**

Estas funciones son las más importantes para la etapa de ortorectificación de imágenes, sin embargo ellas hacen uso de otras presentadas en lenguaje C en el Anexo1 de esta tesis.

Una vez realizado este proceso se georeferencia la imagen Ortorectificada y recortada. Para ello se crea, por medio del programa denominado en el programa principal genera\_datos\_TFW, un archivo TFW que se explicará con mayor detalle en la siguiente sección

### 3.3.6 Proceso de Georeferenciación de Imagen.

El proceso de Georeferenciación se dará usando una de las utilidades que nos brinda GDAL, específicamente (gdal\_translate), la cual permite convertir una imagen de un formato estándar (en nuestro caso BMP) hacia un formato GEOTIFF, que posee coordenadas geográficas. Para ello nuestro programa deberá generar un archivo de texto TFW (World File) que tendrá datos como las coordenadas del origen de la imagen a georeferenciar, su resolución y rotación. A continuación la información que debe contener este archivo.

- Tamaño del pixel en la dirección x en unidades metros/pixel
- Rotación alrededor del eje y
- Rotación alrededor del eje x
- Tamaño del pixel en la dirección y en unidades metros/pixel
- Coordenada x de la esquina superior izquierda(origen en la imagen)
- Coordenada y de la esquina superior izquierda(origen en la imagen)

Estos datos deberán seguir el orden descrito. El programa llamará a una utilidad de GDAL (gdal\_translate) por medio de la función System, que indicará que se ejecute las instrucciones en comillas por el procesador de comandos. Un ejemplo de lo dicho se muestra a continuación.

```
system("gdal_translate -of GTiff -a_srs EPSG:32718 -mo TFW=YES %s %s",archivo_entrada,archivo_salida")
```

El archivo de entrada es el nombre de la imagen en formato BMP, el archivo de salida debe tener el mismo nombre, pero en un formato GEOTIFF. En estas líneas se aprecia que activamos la lectura de un archivo TFW (por medio del comando -mo) que será necesario para activar la lectura del archivo TFW generado en nuestro programa [17]. Por último asignamos el número de la zona UTM, en el caso de Paramonga esta es la zona 18S que es equivalente a colocar EPSG: 32718, una base de datos que posee datums, proyecciones y sistemas de coordenadas [21].



**Figura 3.9:** Archivo TFW de una imagen Geotiff

### 3.3.7 Interfaz de Usuario.

El programa de ortorectificación y georeferenciación de imágenes debe tener una interfaz gráfica de fácil entendimiento que brinde herramientas visuales tales como botones indicadores de eventos, muestra de imágenes, función de agrandamiento de pantalla, mostrar los puntos de control asignados, dar la posibilidad de reiniciar la toma de puntos en caso se dé una mala asignación, por último instrucciones para el usuario de fácil entendimiento. Para ello se decidió utilizar la librería GTK+, la cual es una herramienta multiplataforma para la creación de interfaces gráficas de usuario. Se encuentra escrita en lenguaje C, es software libre y puede ser utilizada por todos los desarrolladores sin ningún tipo de derechos de licencia o regalías [20]. En la figura 3.10 se muestra un modelo de interfaz creada usando la librería GTK+.

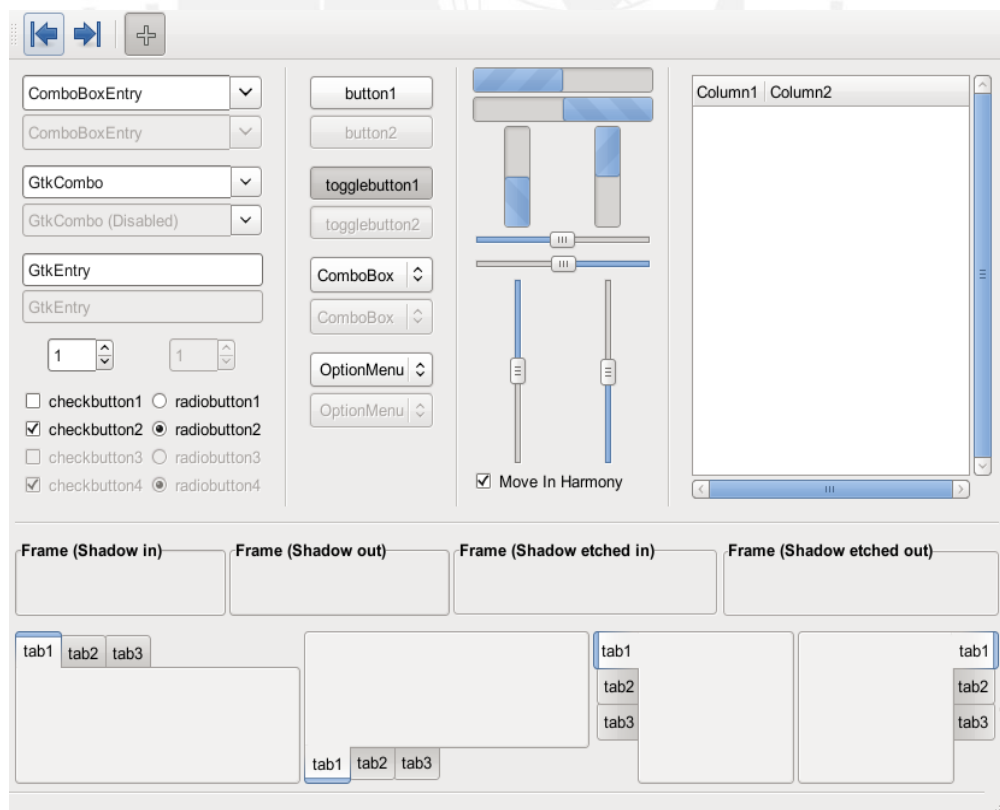


Figura 3.10: Modelo de Interfaz grafica creada con GTK [20]

### 3.4 Programa de Ortorectificación y Georeferenciación.

Las entradas a nuestro programa serán: Una imagen satelital y un registro de imágenes. Sus nombres estarán en un archivo de texto denominado `imagenes.txt`, el cual se muestra en la figura 3.11. El programa buscará este archivo de texto y sabrá con que imágenes trabajará para el proceso de ortorectificación y georeferenciación.



Figura 3.11: Ingreso de datos de entrada

Los archivos de salida que entregará el programa son: Imagen ortorectificada, un archivo TFW y la imagen georeferenciada. Estos se guardarán en los nombres encontrados en el archivo de texto `salida_ortorectificacion`. El programa asigna los resultados a estos nombres encontrados en este archivo de texto. Ver figura 3.12



Figura 3.12: Nombre de archivos de salida

El nombre `registro0001_o.bmp` se refiere a una imagen ortorectificada. Para ortorectificar y georeferenciar diversas imágenes bastará con modificar los nombres en los archivos de texto mostrados.

En la figura 3.13 se muestra la interfaz de usuario para el programa de ortorectificación y georeferenciación. Según los nombres ingresados en el archivo de texto imágenes.txt se mostrará las imágenes con que trabajará nuestro programa. Previamente por línea de comandos se nos pedirá el número de puntos de control a tomar en estas.

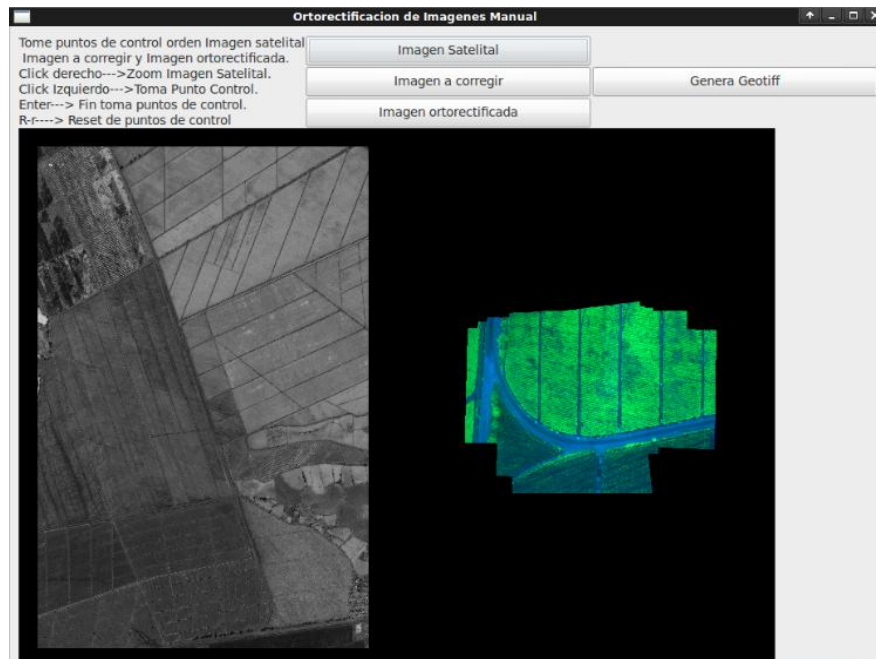


Figura 3.13: Interfaz de entrada al programa

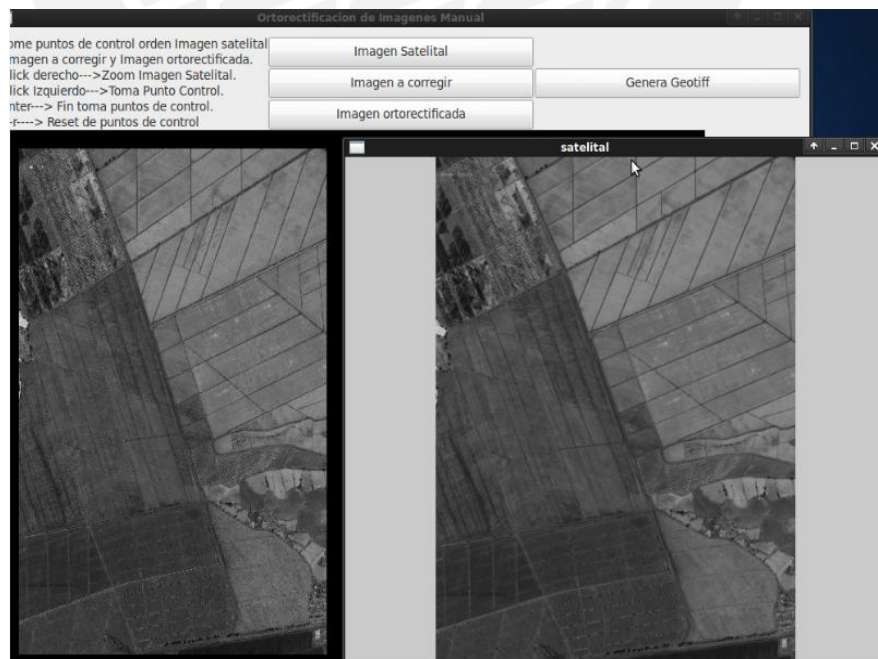
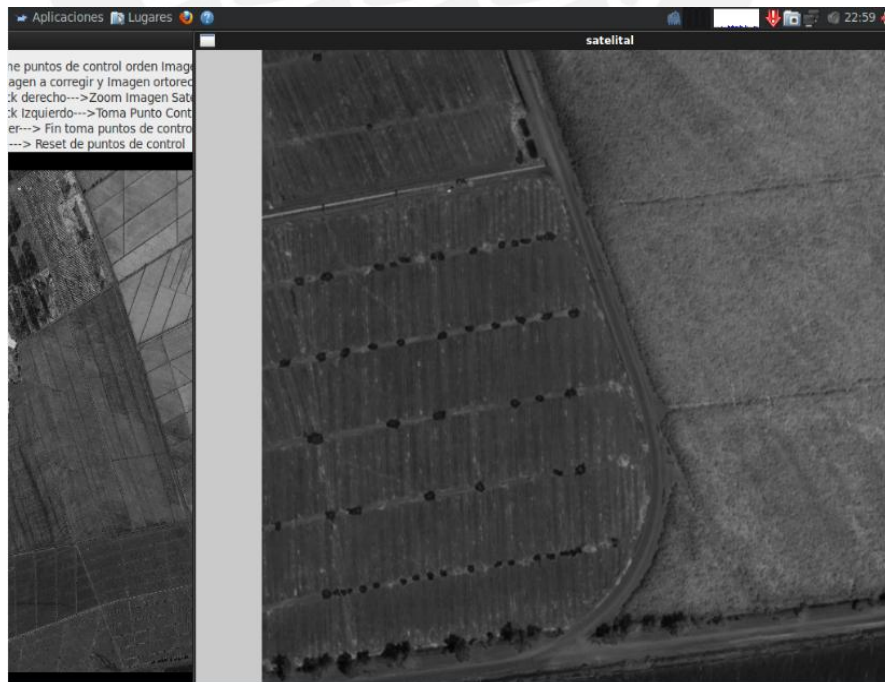


Figura 3.14: Muestra de Imagen Satelital

En la figura 3.14 se seleccionó el evento (presión de botón haciendo uso del click del mouse) Imagen Satelital, es por ello que aparece una nueva ventana que contiene a esa imagen y donde se realizará la toma de puntos. Para tener una mejor visión de toma de puntos en la imagen satelital, debido a que es de un tamaño grande, se creó la función de agrandamiento de región (zoom). Para acceder a ella se hace uso del click derecho del mouse en la zona donde deseamos aplicarla. Este mostrará un área de 800\*800 pixeles a la izquierda del pixel señalado por medio del click derecho, siendo este el vértice inferior derecho de la región cuadrada formada. La función Reset creada en el programa (Letra del teclado R-r) permite “resetear” este zoom, en caso se tome una zona que no corresponde. La asignación de puntos de control se realiza haciendo uso del click izquierdo del mouse y al finalizar la toma total de puntos se presiona la tecla Enter. La imagen generada por nuestro programa en el momento de realizar la función zoom a una región de la imagen satelital se muestra en la figura 3.15. Si por alguna razón se muestra una región no deseada, existe la posibilidad de volver a la imagen original mostrada en la figura 3.14. Para ello se hace uso de la función reset de zoom presionando la tecla (r-R del teclado).



**Figura 3.15:** Aplicación de función zoom en una zona de interés

En la figura 3.16 se muestra la toma de un punto de control en una región específica de la imagen satelital que fue obtenida por medio de la aplicación de un zoom en una zona de esta. El programa tiene una función denominada dibujar\_puntos, la cual grafica círculos de color blanco, de un radio especificado al inicio del programa, sobre cada uno de los puntos de control tomados.



**Figura 3.16:** Toma de primer punto de control en Imagen Satelital

En este ejemplo se tomarán tres puntos de control tanto en la imagen satelital como el registro de imagen (a corregir), estos deberán seguir un orden, se recomienda seguir un sentido ya sea horario o antihorario. Primero se realizará la toma de puntos en la Imagen Satelital, este orden puede cambiar pero se opta por iniciar con esta imagen por ser la de referencia. Luego de la toma de puntos se procede a realizar el mismo proceso para el registro. Para ello se debe presionar la casilla Imagen a corregir. Ocurrido esto se mostrará una ventana pequeña de referencia que ayude al usuario a saber en qué posiciones de la imagen satelital tomó los puntos de control. Ver figura 3.17

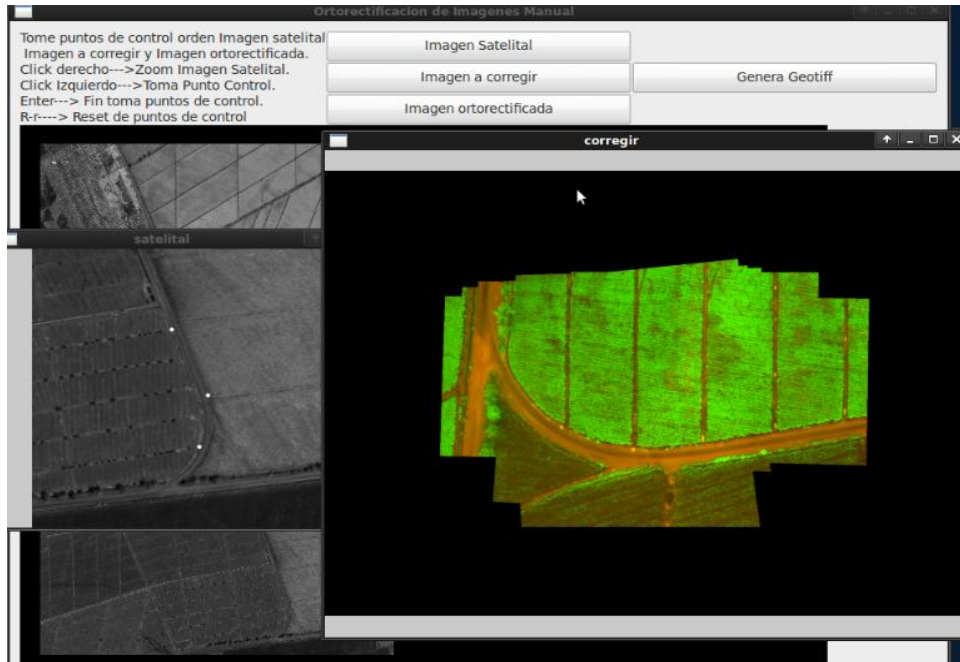


Figura 3.17: Presión de casilla Imagen a corregir

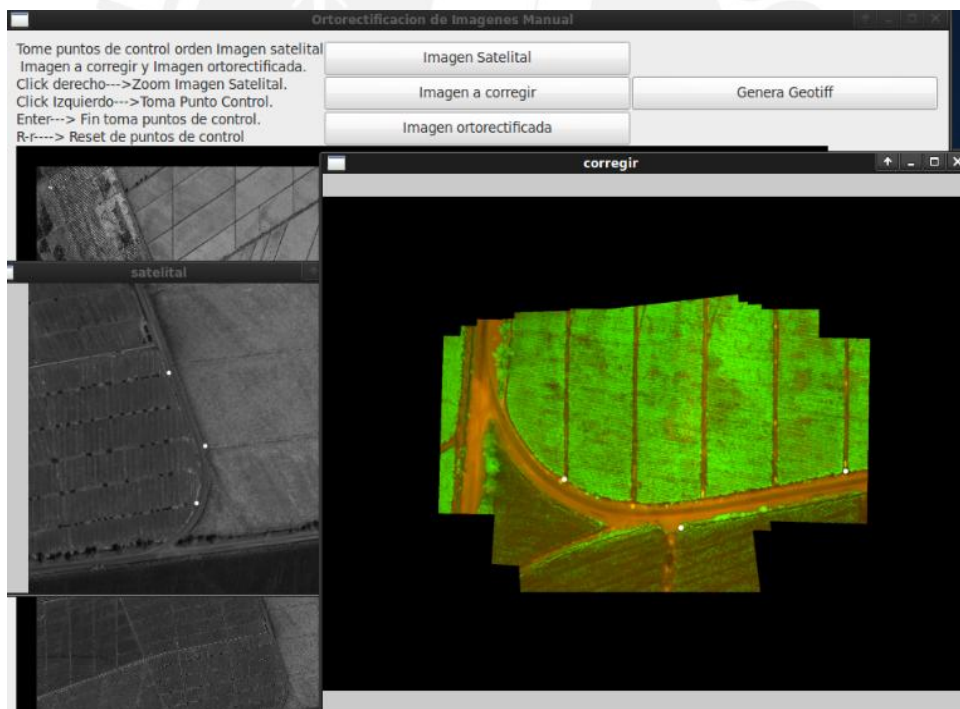
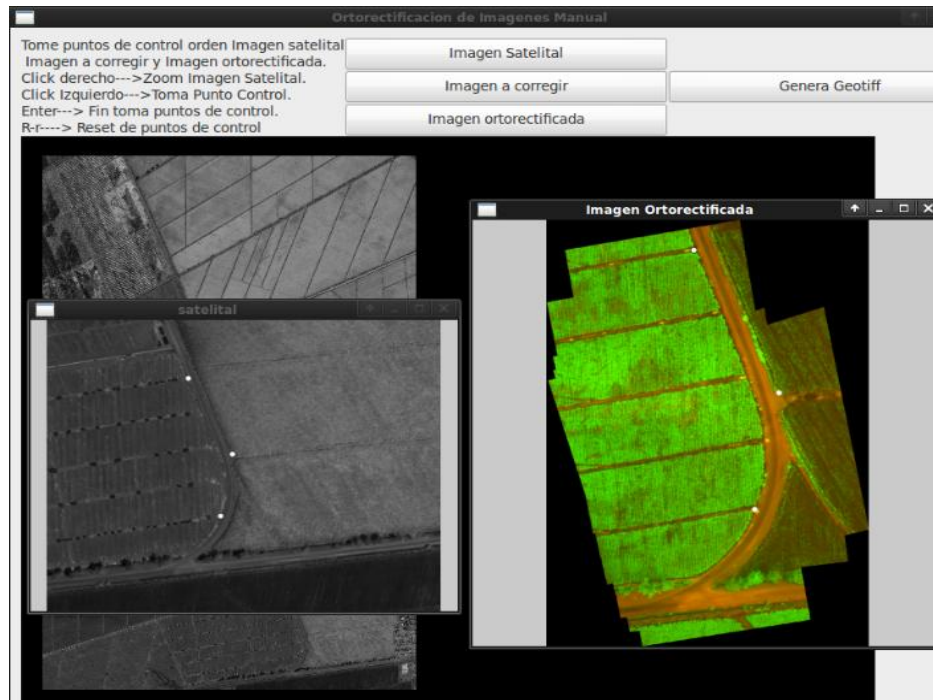


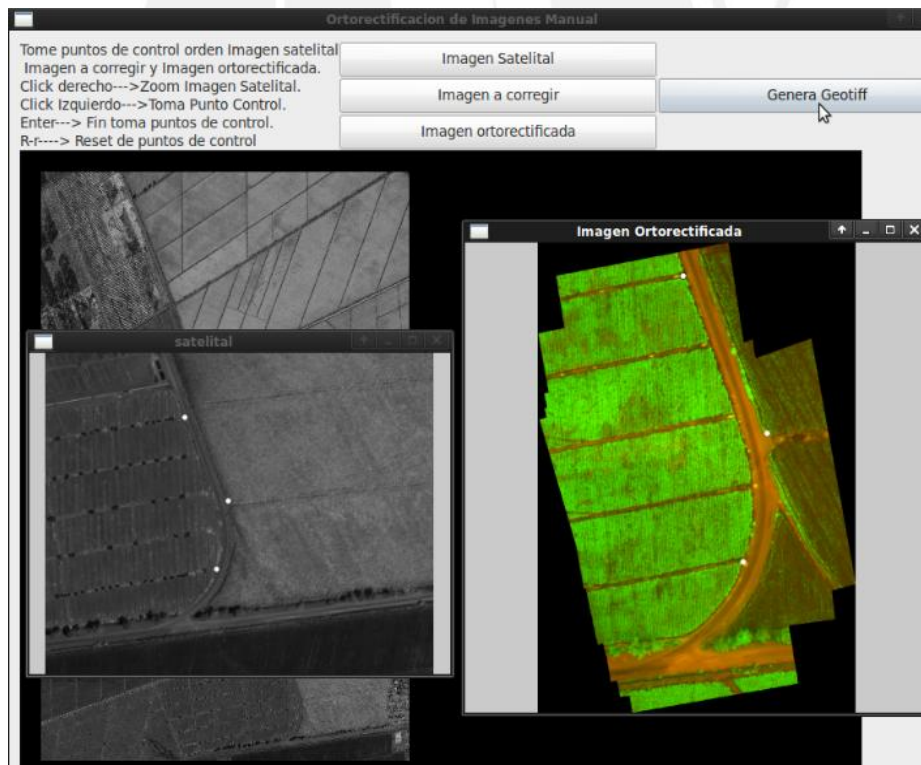
Figura 3.18: Toma de puntos de control en el Registro de Imagen

Una vez asignados los puntos de control en las imágenes, el programa procede a generar la imagen ortorectificada, esta se mostrará presionando el recuadro Imagen Ortorectificada. Ello puede observarse en la figura 3.19.





**Figura 3.19:** Generación y muestra de Imagen Ortorectificada



**Figura 3.20:** Generación de Imagen Geotiff

En la figura 3.20 se realiza la georeferenciación de la imagen ortorectificada presionando la casilla Genera Geotiff. El programa en esta etapa creará un

archivo TFW y lo asignará a una imagen TIFF por medio de GDAL, como se explicó anteriormente.

En el ejemplo mostrado se puede apreciar que un usuario, al observar la imagen satelital, debe identificar la zona donde se ubica el registro de imágenes de manera visual, para realizar la toma puntos de control solo en la zona correspondiente al registro. Sin embargo la aeronave al adquirir las imágenes multiespectrales dispone de un sistema GPS que indica el lugar geográfico donde se tomaron estas, ello nos brinda una referencia aproximada para ubicarnos en la imagen satelital de manera más exacta, ya que esta posee coordenadas geográficas. La verificación de la imagen ortorectificada y georeferenciada se realizará en el software GIS GRASS y como veremos en el capítulo 4, los resultados dependerán de la ubicación de los puntos y de su cantidad.



## Capítulo 4: Pruebas Finales y comprobación de Resultados.

### 4.1 Resultados en la etapa de Ortorectificación y Georeferenciación

En este capítulo se analizará las imágenes obtenidas por medio del programa. Se mostrará algunas antes de realizarse el proceso de ortorectificación y georeferenciación para luego mostrarlas en el GRASS GIS, donde se visualizarán ambas imágenes superponiéndolas. El GRASS las ubica de acuerdo a sus coordenadas geográficas, este proceso es automático.

La siguiente imagen corresponde al registro denominado reg0007.bmp. Este será ingresado al programa y se tomarán tres puntos de control en ambas imágenes. Estos se tomaron lo más alejados posibles, es decir que el triángulo formado al unir los tres puntos abarque la mayor área posible en la imagen. Ver figura 4.1

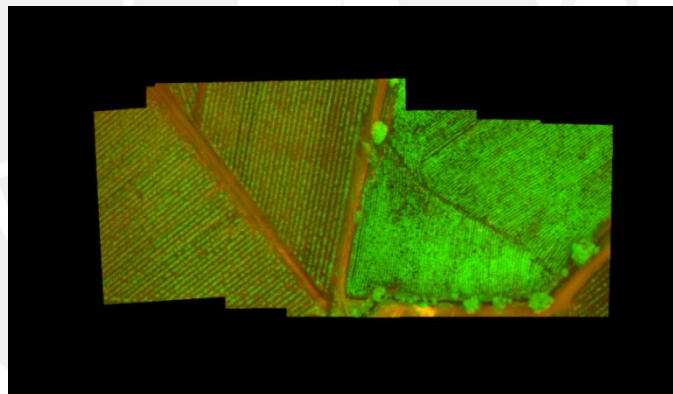


Figura 4.1: Registro de Imagen reg0007

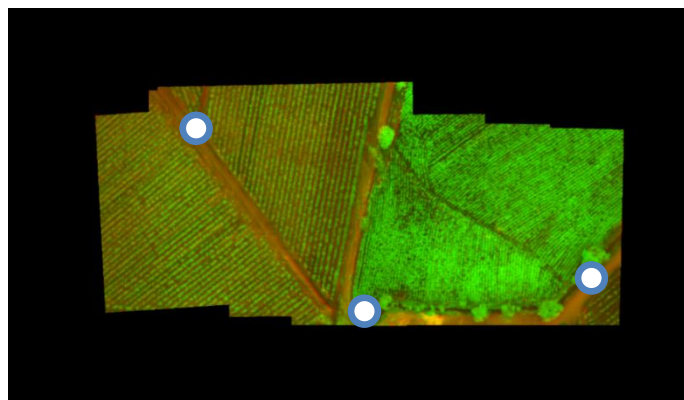
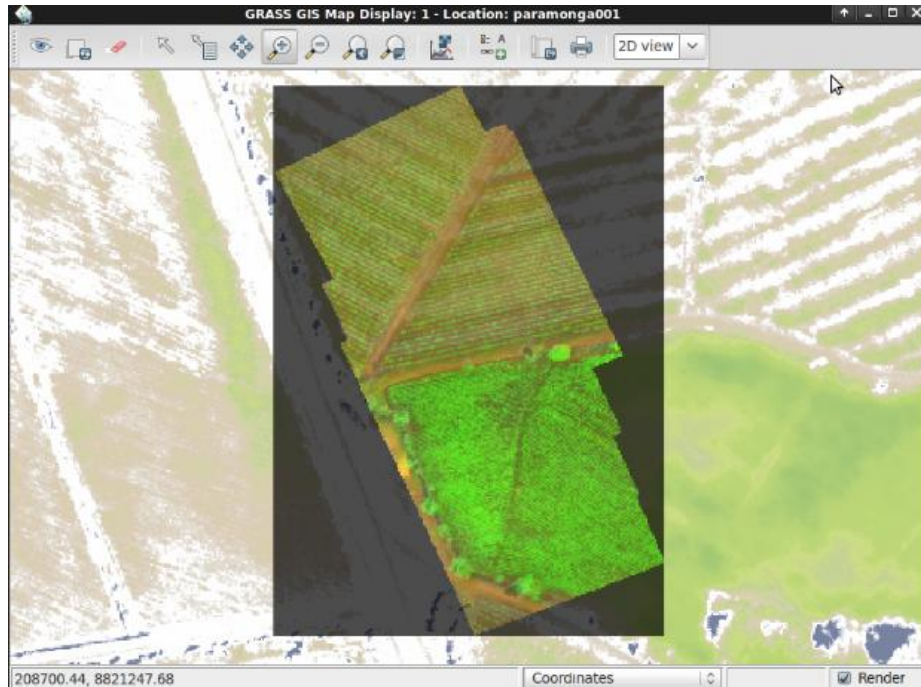


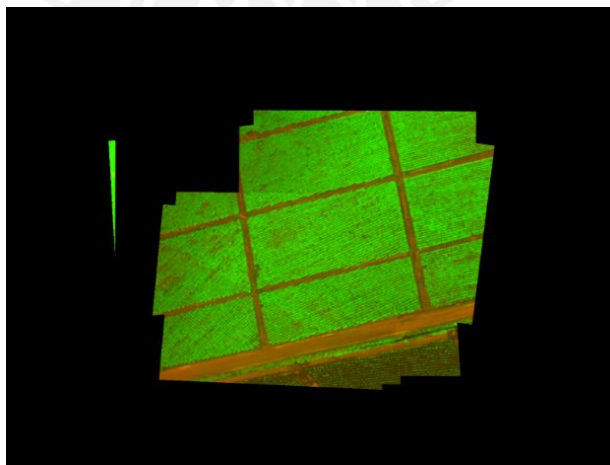
Figura 4.2: Toma de Puntos de Control en el registro reg0007

La imagen ortorectificada y georeferenciada correspondiente al registro reg0007.bmp se muestra a continuación superpuesta en la Imagen Satelital gracias al software GIS GRASS. Ver figura 4.3.

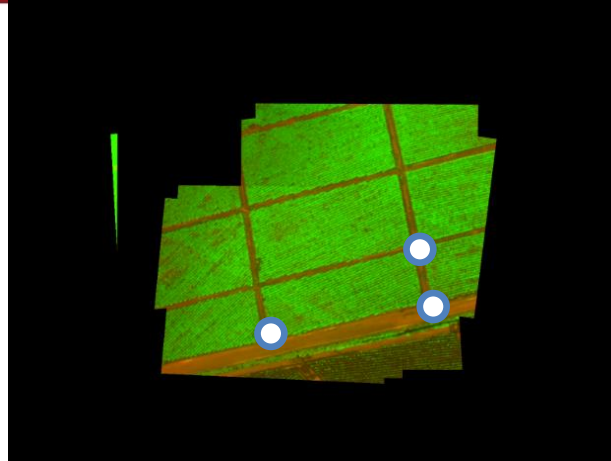


**Figura 4.3:** Imagen ortorectificada y georeferenciada vista en GRASS GIS

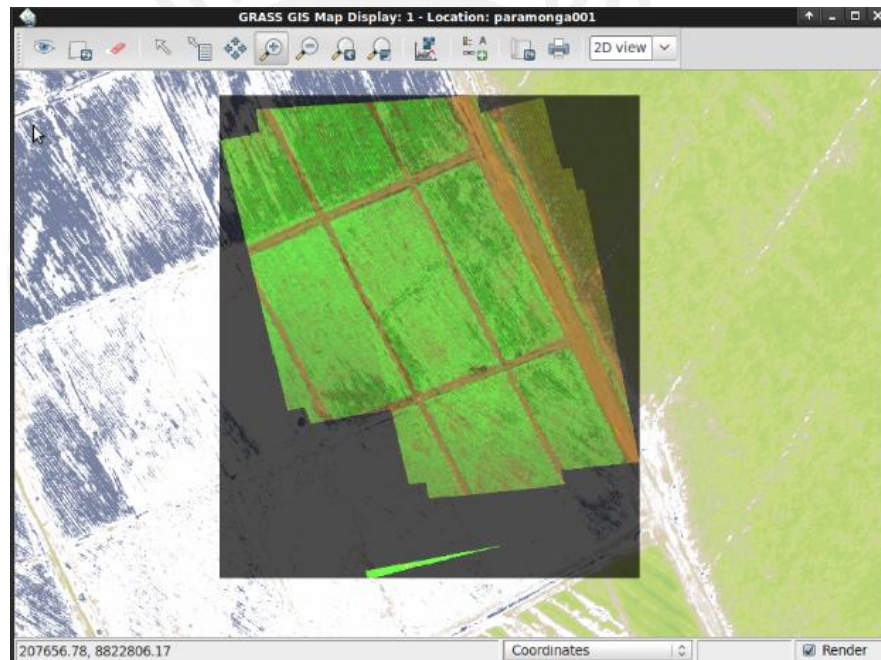
La siguiente imagen corresponde a una de mayor tamaño que la anterior, es decir, con más detalles. Se colocará adrede puntos cercanos en la imagen para analizar los resultados. La imagen se muestra en la figura 4.4.



**Figura 4.4:** Registro de Imagen reg0003



**Figura 4.5:** Toma de Puntos de Control en el registro reg0003



**Figura 4.6:** Registro0003 ortorectificado y georeferenciado visto en GRASS GIS

Se puede observar en la figura 4.6 que el resultado no es tan bueno como el de la figura 4.3, ello se debe a la ubicación de los puntos. Estos debieron colocarse, como se mencionó en el ejemplo anterior, lo más alejado posible y que el área formada al unirlos consecutivamente abarque la mayor cantidad de área en la imagen. Otra solución sería tomar más de tres puntos de control en la imagen de la figura 4.5, y como se puede apreciar esta posee muchos puntos característicos.

El registro mostrado en la figura 4.7 será analizado con 4 puntos de control, estos serán tomados lo más alejado posible y formando un cuadrilátero convexo al unir puntos consecutivos. Este es otro detalle a tener en cuenta, es decir se debe evitar que tres puntos consecutivos sean colineales.

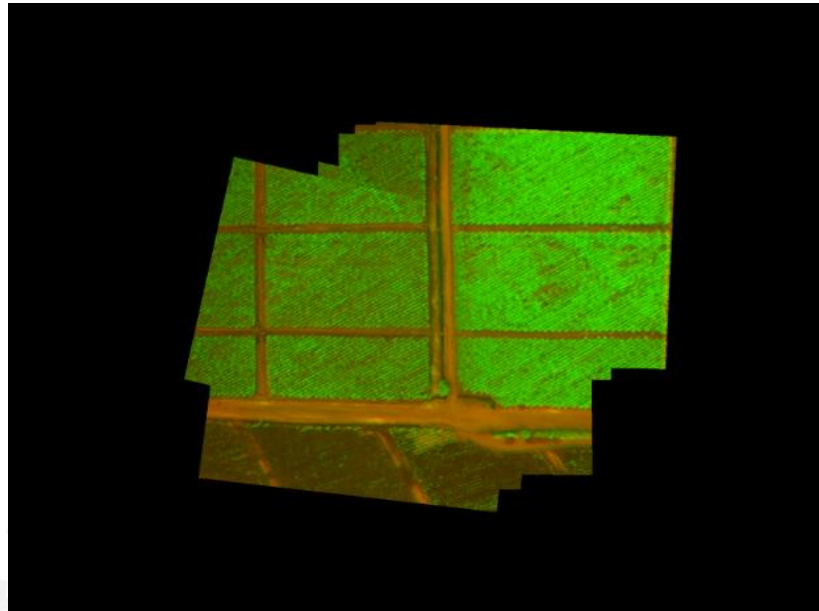


Figura 4.7: Registro de imagen reg0004

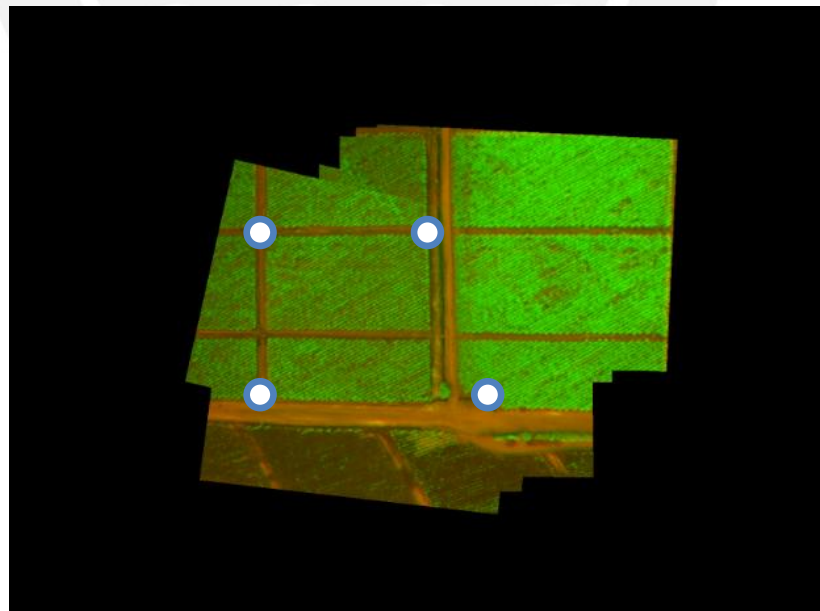
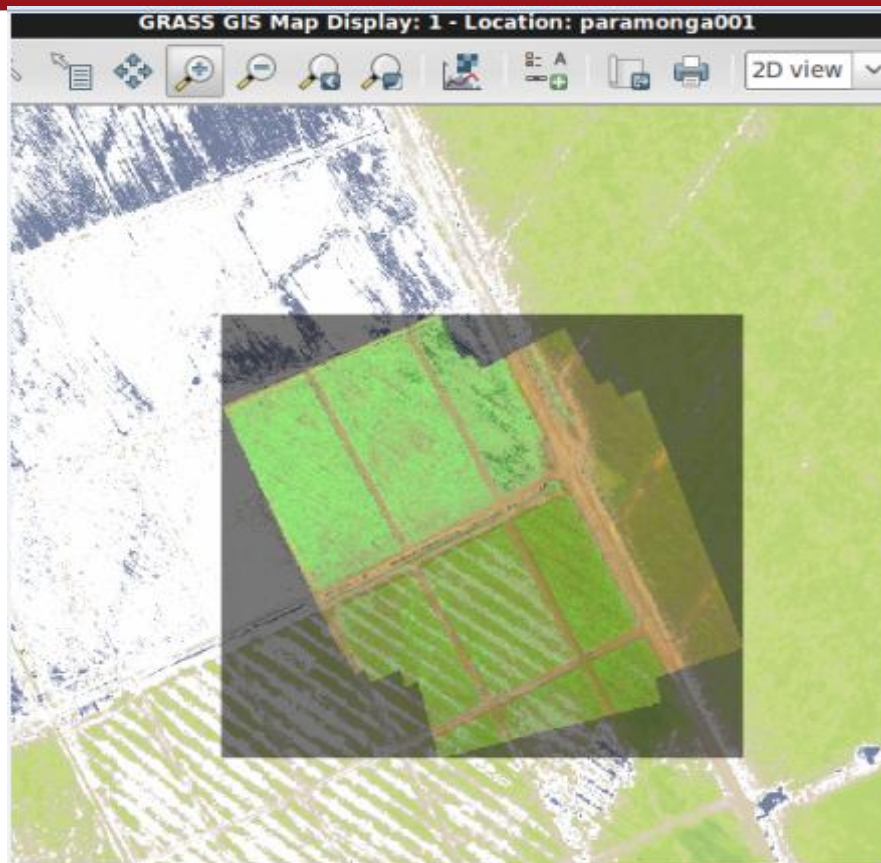


Figura 4.8: Toma de Puntos de Control en el registro reg0004



**Figura 4.9:** Registro0004 ortorectificado y georeferenciado visto en GRASS GIS

Se puede apreciar en figura 4.9 que la ortorectificación y georeferenciación para el registro0004 fueron realizadas correctamente. Esto ocurrió debido a una buena toma de puntos de control que abarcaron gran parte de la imagen. Con tres puntos en la imagen se comprobó que el resultado era similar, debido posiblemente a que este registro de imagen no contiene muchas distorsiones en la zona donde se dejó de tomar un punto, ello no siempre ocurre. Para imágenes de mayor cantidad de detalles se requiere tomar más puntos de control.

En la siguiente imagen se muestra como la toma de tres puntos de control en una zona determinada corregirá esta región perfectamente, sin embargo al no tener más puntos en otra zona de área considerable en la imagen, ocasionará una ligera desviación en esta parte.

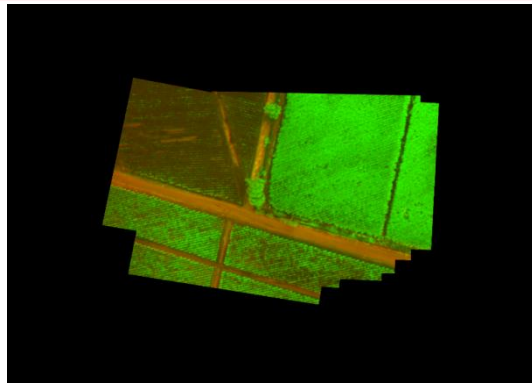


Figura 4.10: Registro de imagen reg0016

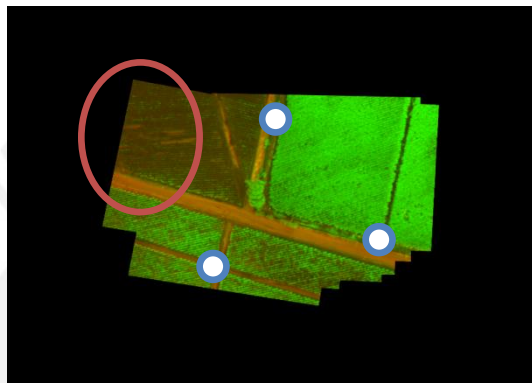


Figura 4.11: Toma de Puntos de Control en el registro reg00016

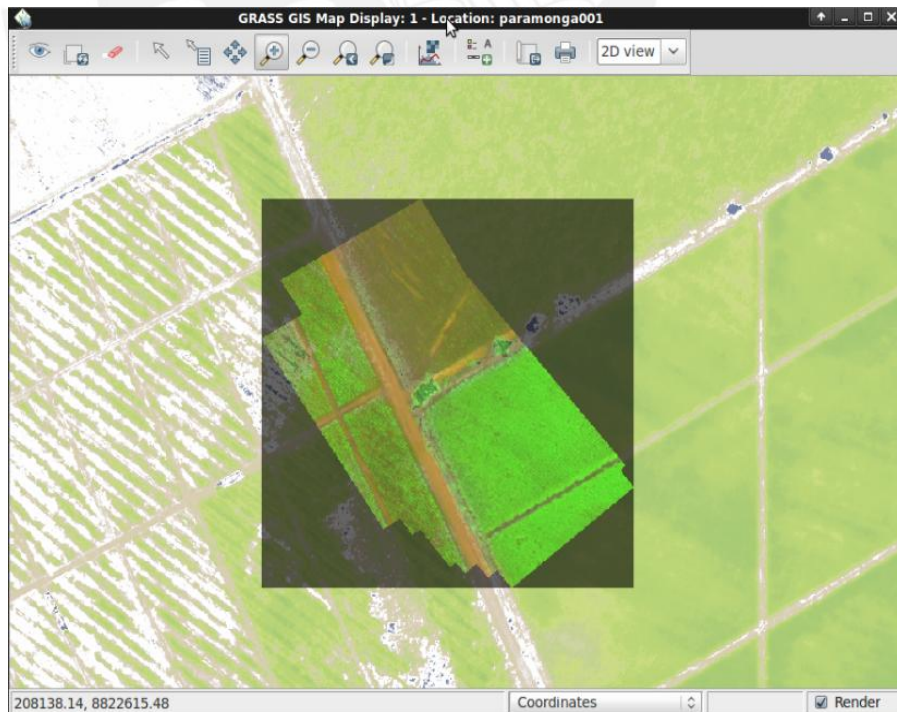


Figura 4.12: Registro0016 ortorectificado y georeferenciado visto en GRASS GIS



En la figura 4.12 se puede observar una ligera desviación de la pista en la imagen ortorectificada con respecto a la imagen satelital, esto debido a la falta de un punto de control la zona superior del registro de imagen (indicado con un circulo de contorno rojo en figura 4.11). Al colocar un punto adicional de control en la parte inferior del registro de imagen la desviación disminuye, pero sigue existiendo. Es por ello que se requiere de una imagen más grande y con algún punto característico en la zona superior.

En este capítulo se mostró los resultados obtenidos al ortorectificar y georeferenciar 4 registros de imagen, sin embargo se trabajó con mayor cantidad, los cuales están disponibles en el anexo de esta tesis.

La siguiente y última prueba muestra la colocación de varios registros de imagen ortorectificados y georeferenciados sobre una imagen NDVI satelital por medio del GRASS GIS. En ella los registros en conjunto dan la apariencia de formar uno más grande, esto posibilitaría la formación de registros más grandes y con un tiempo de procesamiento rápido.



**Figura 4.13:** Superposición de varios registros ortorectificados y georeferenciados sobre una Imagen Satelital

## Conclusiones

- 1) El programa elaborado puede ser usado para ortorectificar y georeferenciar imágenes adquiridas desde una aeronave en cualquier fecha, con lo cual se cumple los requerimientos de la tesis. Solo se necesita de una imagen satelital de la zona. Esta puede haber sido tomada en una fecha anterior (años) a las imágenes adquiridas desde el avión, debido a que el proceso se realizará de manera manual. El precio de una imagen satelital tomada en fechas pasadas es mucho más económica.
- 2) Las imágenes ortorectificadas y georeferenciadas son interpretadas de manera correcta por el GRASS GIS, con lo cual están aptas para un posterior procesamiento en este Sistema de Información Geográfica.
- 3) La creación de una interfaz gráfica para el programa proporciona un fácil entendimiento del mismo, con lo cual se cumple el propósito de ser una herramienta de uso rápido y sencillo.
- 4) Tomar puntos de control que abarquen un área extensa en la imagen proporciona un mejor resultado. Estos deberán estar lo más alejado posible. Una toma de tres puntos de control genera una buena corrección en imágenes pequeñas y de pocos detalles. Para imágenes de mayor tamaño se requiere mayor cantidad de puntos distribuidos ocupando el mayor área posible de la imagen.

## Recomendaciones

- 1) Colocar señalizaciones en los terrenos de cultivo, tales como estacas de gran tamaño, objetos de un tamaño apreciable con gran reflectancia en la banda infrarroja, ayudarían a realizar una mejor ortorectificación manual y automática. Esta técnica de colocar señalizaciones, las cuales se conoce su posición geográfica, se utiliza en países desarrollados y son de mucha ayuda al momento de georeferenciar imágenes.
- 2) Obtener registros de imágenes que abarquen una mayor área en la zona de cultivo, permitirá encontrar más detalles en las imágenes, por lo tanto una mayor cantidad de puntos de control. Ello proporcionará una efectiva ortorectificación y georeferenciación como se mencionó en el capítulo de pruebas y resultados.
- 3) Verificar la imagen ortorectificada y georeferenciada en el GIS GRASS tomando en un primero momento 3 puntos de control. Si la corrección no resulta exitosa, es decir se tiene desviaciones en pistas o algunas deformaciones con respecto a la imagen satelital, se debe asignar mayor cantidad de puntos de control para realizar un mejor ajuste en la imagen y por ende una mejor ortorectificación.

## Fuentes

- [1] Instituto Nacional de Innovación Agraria. “Resumen Ejecutivo”.  
[consultado 05/05/2011].  
<http://www.inia.gob.pe/cana/resumen.htm>
- [2] FAOSTAT. “Top Production –Sugar-Cane-2008”.  
[consultado 07/05/2011].  
<http://faostat.fao.org/site/339/default.aspx>
- [3] CONFIEP. “Cámara de comercio de Piura: Incursión de nuevas empresas”. [consultado 11/05/2011].  
<http://confiep.org.pe/articulos/867-camara-de-comercio-de-piura-incursión-de-nuevas-empresas-agroindustriales>
- [4] USGS. “What is NDVI”, 2010 [consultado 10/11/2010]  
<http://ivm.cr.usgs.gov/whatndvi.php>
- [5] Inventario de tecnologías disponibles en España para la lucha contra la desertificación. “Teledetección aplicada a la detección temprana del estrés hídrico en cubiertas vegetales”. [consultado 10/03/2011]  
[http://www.marm.es/imagenes/es/0904712280144dc1\\_tcm7-19644.pdf](http://www.marm.es/imagenes/es/0904712280144dc1_tcm7-19644.pdf)
- [6] Sensores Remotos de Bajo Costo para Agricultura de Precisión, 2010.  
[consultado 24/05/2011].  
[http://wiki.pucp.edu.pe/agricultura\\_precision/](http://wiki.pucp.edu.pe/agricultura_precision/)
- [7] Alfonso, P., Piedra, P., Suárez, J., Hernández, Y., & Valdés, Y. Obtención del mapa de rendimiento georeferenciado del cultivo de la papa mediante el empleo de técnicas de agricultura de precisión. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 15(2), 37-41.

- [8] Vermont Center for Geographic Information.” Introduction to Geographic Information System GIS”. [consultado 26/05/2011].  
<http://www.vcgi.org/commres/training/Introduction.pdf>
- [9] T. Lillesand, R. Kiefer. “Remote Sensing and Image Analysis”, 4ta Edition, John Wiley and Sons, Nueva York, 2006.
- [10] Rojas Gómez, Renán Alfredo. Diseño de Un registro de Imágenes orientado a la Agricultura de Precisión. Tesis de Licenciatura en Ciencias e Ingeniería con mención en Ingeniería Electrónica. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú. Facultad de Ciencias e Ingeniería, 2009.
- [11] Gonzalez, R. & Woods R. “Digital Image Processing using MATLAB”. 1era Edition. Prentice Hall. New Jersey, 2004.
- [12] Erdas. “Erdas Field Guide”. [consultado 20/11/2010].  
<http://www.erdas.com/Resources/ERDASFieldGuide.aspx>
- [13] Christopher R. Wren. Academic. “Perspective Transform Estimation”. [consultado 20/05/2011].  
<http://xenia.media.mit.edu/~cwren/interpolator/>
- [14] J.M.Sotoca. “Estimación de movimiento”, Junio 2002.
- [15] A. Goshtasby. “2-D and 3-D Image Registration for Medical. Remote Sensing, and Industrial Applications” Wiley & Sons, 2005.
- [16] Samuel Barreto Melo. “Transformaciones geométricas sobre imágenes digitales”. Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- [17] GDAL - Geospatial Data Abstraction Library. [consultado 10/03/2011]  
<http://www.gdal.org/>

- [18] Gary Bradsky, Adrian Kaehler. "Learning OpenCV Computer Vision with the OpenCV Library". 1era Edición, 2008.
- [19] Boulosa Garcia, Oscar. "Estudio comparativo de descriptores visuales para la detección de escenas cuasi-duplicadas". Proyecto Fin de Carrera. Universidad Autónoma de Madrid, 2011.
- [20] The GTK+ Project. [consultado 06/06/2011]  
<http://www.gtk.org/>
- [21] Geomatics. "EPSG Geodetic Parameter Dataset".  
[consultado 15/06/2011].  
<http://www.epsg.org/CurrentDB.html>
- [22] Lowe, David G. "Object Recognition from local Scale-Invariant Features". International Conference on Computer vision, Corfu, Greece (1999), pp.1150-1157.
- [23] Herbert Bay, Andreas Ess, Tinne Tuytelaars, Luc Van Gool  
"SURF: Speeded Up Robust Features", Computer Vision and Image Understanding (CVIU), Vol. 110, No. 3(2008), pp. 346-359.