

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



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

DESARROLLO DE UN MÓDULO SIG PARA EL MANEJO DE  
IMÁGENES MULTIESPECTRALES ORIENTADO A LA  
AGRICULTURA DE PRECISIÓN

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

**Mario Balcázar Guerrero**

ASESOR: Donato Andrés Flores Espinoza

**Lima, agosto del 2011**

## RESUMEN

El uso de nuevas tecnologías en el campo de la agricultura ha permitido que los productores agrícolas, en diversos países desarrollados, accedan a nuevos mercados internacionales avalados por la calidad de sus productos. Calidad que han logrado teniendo una mejor gestión de sus cultivos en base a tecnologías tales como los Sistemas de Información Geográfica, los cuales se han convertido en una herramienta vital para la aplicación de la llamada Agricultura de Precisión. Con el fin de poder aplicar estas tecnologías al ámbito nacional, el presente trabajo busca desarrollar una interfaz que haga uso de las herramientas propias de los Sistemas de Información Geográfica, en particular del SIG GRASS, para la integración y el posterior análisis de imágenes multiespectrales de cultivos adquiridas mediante el uso de un sistema de sensado remoto desarrollado en la Pontificia Universidad Católica del Perú, con las cuales se permita evaluar la situación actual de los mismos, en base al índice vegetativo conocido como factor NDVI.

El trabajo se desarrolla en cuatro capítulos. El primer capítulo presenta el proceso actual de monitoreo de cultivos, los certificados de calidad expedidos a las empresas agrícolas y la problemática que surge al hacer uso de dicho proceso. El segundo capítulo comprende el estado del arte de la investigación, los conceptos generales necesarios para el desarrollo de la tesis y el modelo teórico aplicado. En el tercer capítulo se exponen los objetivos y los requerimientos de la tesis, así como también las etapas y las respectivas tareas que estas abarcan. En el cuarto capítulo, se presentan los requerimientos mínimos del equipo a usar para el desarrollo de la solución, asimismo se describe dicho desarrollo y por último se analiza el mismo en base a las imágenes generadas.

Finalmente, se llega a la conclusión de que el SIG GRASS permite procesar, analizar y posteriormente visualizar la información generada en base a las imágenes multiespectrales. Así mismo, se concluye que la generación de archivos GeoTIFF permite la integración de las imágenes capturadas con sus respectivas coordenadas geográficas de tal manera que, las imágenes que se manipulen en GRASS estén apropiadamente georreferenciadas.

## ÍNDICE

<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>7</b>
<b>CAPÍTULO 1: PROCESOS ACTUALES DE MONITOREO DE CULTIVOS</b>	<b>8</b>
1.1. Descripción del proceso actual.	8
1.2. Debilidades del proceso actual.	9
1.3. Normas y Certificaciones.	9
1.3.1. Buenas Prácticas Agrícolas (BPA).	9
1.3.2. EurepGAP (GLOBALGAP).	10
1.3.3. USDA GAP.	11
1.4. Declaración del marco problemático.	11
<b>CAPÍTULO 2: TECNOLOGÍAS ORIENTADAS A LA AGRICULTURA DE PRECISIÓN</b>	<b>12</b>
2.1. Definición de Agricultura de Precisión.	12
2.2. Estado del Arte.	12
2.2.1. Presentación del asunto de estudio.	12
2.2.2. El Estado de la Investigación.	13
2.2.3. Síntesis del asunto de estudio.	18
2.3. Conceptualizaciones Generales.	19
2.3.1. Sensado Remoto.	19
2.3.2. Georrectificación.	19
2.3.3. GeoTIFF.	19
2.3.4. Sistema Geodésico Mundial 1984 (WGS 84).	19
2.3.5. Factor NDVI.	20
2.4. Modelo teórico.	20
2.4.1. Elementos componentes y su interacción.	20
2.4.1.1. Etapas de adquisición de imágenes y recepción de datos GPS.	21
2.4.1.2. Etapa de procesamiento de imágenes.	22
2.4.1.3. Etapas de análisis y visualización de imágenes en GRASS.	24
<b>CAPÍTULO 3: APLICACIÓN DE UN SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA COMO SOLUCIÓN A LA PROBLEMÁTICA</b>	<b>28</b>
3.1. Objetivos de la investigación.	28

3.1.1. Objetivo principal.	28
3.1.2. Objetivos específicos.	28
3.2. Requerimientos del sistema.	28
3.3. Diagrama de bloques.	29
3.3.1. Georrectificación de imágenes.	29
3.3.2. Creación de la imagen GeoTIFF.	30
3.3.3. Creación de mapas ráster.	30
3.3.4. Cálculo del factor NDVI.	30
3.3.5. Visualización de datos NDVI.	30
3.3.6. Visualización de mapa NDVI.	30
3.4. Pseudocódigos.	31
3.4.1. Georrectificación de imágenes.	31
3.4.2. Creación de la imagen GeoTIFF.	31
3.4.3. Creación de mapas ráster.	31
3.4.4. Cálculo del factor NDVI.	31
3.4.5. Visualización de datos NDVI.	32
3.4.6. Visualización de mapa NDVI.	32
<b>CAPÍTULO 4: PRUEBAS Y RESULTADOS</b>	<b>33</b>
4.1. Requerimientos mínimos de hardware y de software.	33
4.2. Descripción del hardware y del software utilizado.	33
4.3. Descripción de las imágenes adquiridas.	34
4.4. Desarrollo de la solución.	34
4.4.1. Procesamiento de imágenes en MATLAB.	34
4.4.1.1. Georrectificación de imágenes.	34
4.4.1.2. Creación de la imagen GeoTIFF.	39
4.4.2. Análisis de imágenes en GRASS.	40
4.4.3. Visualización de imágenes en GRASS.	41
4.5. Análisis de los resultados.	44
<b>CONCLUSIONES</b>	<b>50</b>
<b>RECOMENDACIONES</b>	<b>51</b>
<b>FUENTES</b>	<b>52</b>

## INTRODUCCIÓN

La Agricultura de Precisión se ha convertido en un concepto agronómico cada día más difundido cuya aplicación contribuye al uso eficiente de los insumos, el aumento de la producción agrícola y el cuidado del medio ambiente. El uso de los Sistemas de Información Geográfica (SIG), en conjunto con la aplicación de este concepto, ha permitido el desarrollo de sendos proyectos de investigación, los cuales han tenido como objetivo la identificación y el posterior manejo de las variables agrícolas inmersas en todo proceso productivo.

Es en esta línea, que ya desde hace un par de años, la Pontificia Universidad Católica del Perú en conjunto con el Centro Internacional de la Papa (CIP) han comenzado su propio proyecto de investigación titulado “Agricultura de Precisión para la Producción de Cultivos de Seguridad Alimentaria y de Agro Exportación”. Dicho proyecto está siendo financiado por el Programa de Ciencia y Tecnología (FINCyT) con el fin de desarrollar un sistema que permita hacer uso de tecnologías que, aplicadas coherentemente, sienten una base para la aplicación de la Agricultura de Precisión en nuestro país.

Es así que el presente documento tiene como objetivo servir de complemento para dicho proyecto, centralizándose en brindar información georreferenciada y desarrollando, finalmente, una interfaz en donde se vea plasmada la información que se ha obtenido en etapas previas.

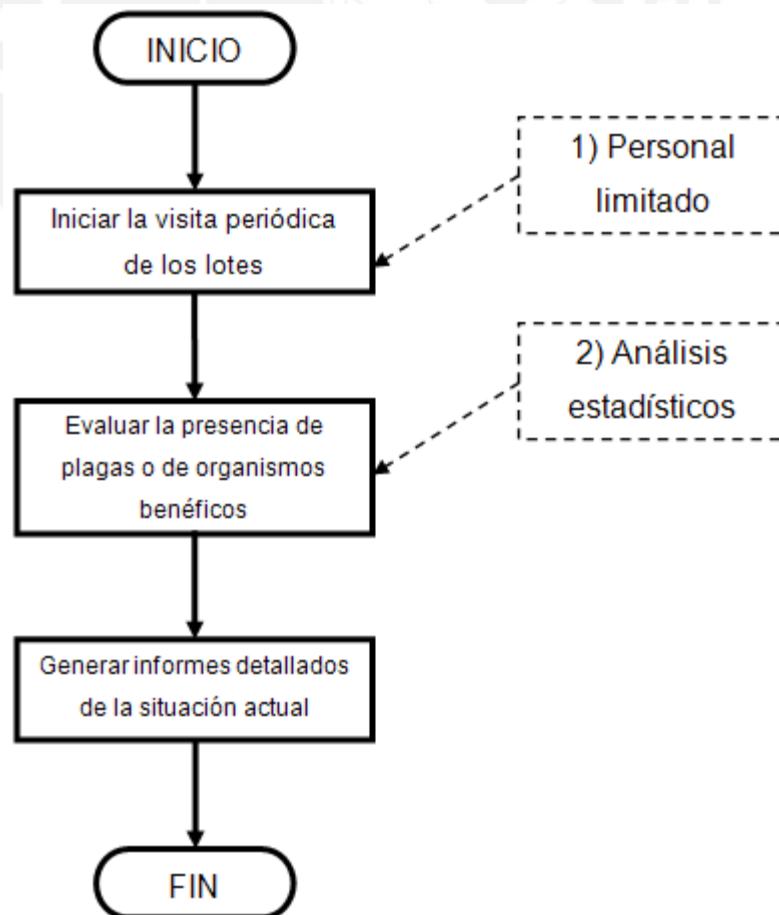
## CAPÍTULO 1

### PROCESOS ACTUALES DE MONITOREO DE CULTIVOS

En el presente capítulo se describe el proceso de monitoreo de cultivos, siendo este el más usado en el ámbito nacional. Asimismo, se hace mención a las certificaciones BPA y qué empresas nacionales están certificadas bajo dichas normas. Finalmente, se busca identificar la problemática que surge al hacer uso, únicamente, del proceso antes mencionado.

#### 1.1. Descripción del proceso actual.

El monitoreo de cultivos consiste en visitar periódicamente los lotes de cultivos, evaluando la presencia de plagas, de organismos benéficos y la interacción que ambos tienen con las áreas cultivadas en base a una cierta cantidad de muestras. Tras lo cual, se generan informes detallados con los cuales el productor pueda tomar una mejor decisión. [1]



**Figura 1.1:** Diagrama de flujo del proceso de Monitoreo de cultivos.



## 1.2. Debilidades del proceso actual.

Como se puede observar en la figura 1.1, el proceso de Monitoreo de cultivos presenta dos debilidades. Las mismas, son descritas en la tabla 1.1.

**Tabla 1.1:** Debilidades del proceso de Monitoreo de cultivos.

Debilidades	Explicación
1) Personal limitado	El personal encargado de realizar las visitas periódicas toma muestras de los cultivos y hace el análisis a partir de estas muestras. Por otro lado, los períodos entre visitas pueden ser prolongados en el caso que se tengan que encargar de campos de cultivos extensos.
2) Análisis estadísticos	A partir de las muestras obtenidas se realizan estimaciones sobre el estado actual de los cultivos. Se generan los informes y se toman las decisiones basadas en estas estimaciones.

## 1.3. Normas y Certificaciones.

### 1.3.1. Buenas Prácticas Agrícolas (BPA).

Las BPA (GAP por sus siglas en inglés) son "prácticas orientadas a la sostenibilidad ambiental, económica y social para los procesos productivos de la explotación agrícola que garantizan la calidad e inocuidad de los alimentos y de los productos no alimenticios", (documento del COAG FAO, 2003). [2]

En el ámbito nacional, empresas como Country Home [3], Agroindustrias AIB [4] y Agrícola Chapi [5] cuentan con certificaciones GAP, lo cual garantiza que dichos fundos trabajan bajo los estándares de higiene y saneamiento adecuados, respetando el medio ambiente y promoviendo el desarrollo y seguridad del trabajador.

### 1.3.2. EurepGAP (GLOBALGAP).

GLOBALG.A.P es un organismo privado que establece normas voluntarias a través de las cuales se puede certificar productos agrícolas en todas partes del mundo. Dichas normas, fueron diseñadas principalmente para brindar confianza al consumidor acerca de la manera que se lleva a cabo la producción agropecuaria: minimizando el impacto perjudicial de la explotación en el medio ambiente, reduciendo el uso de insumos químicos y asegurando un proceder responsable en la salud y seguridad de los trabajadores, como también en el bienestar de los animales. [6]

En el ámbito nacional, empresas como MC&M S.A. [7], Danper [8] y Green Perú [9] cuentan con certificaciones GLOBALG.A.P. En el caso particular de Green Perú, dicha certificación le fue otorgada por PRIMUSLABS.COM, tal y como se muestra en la figura 1.2.

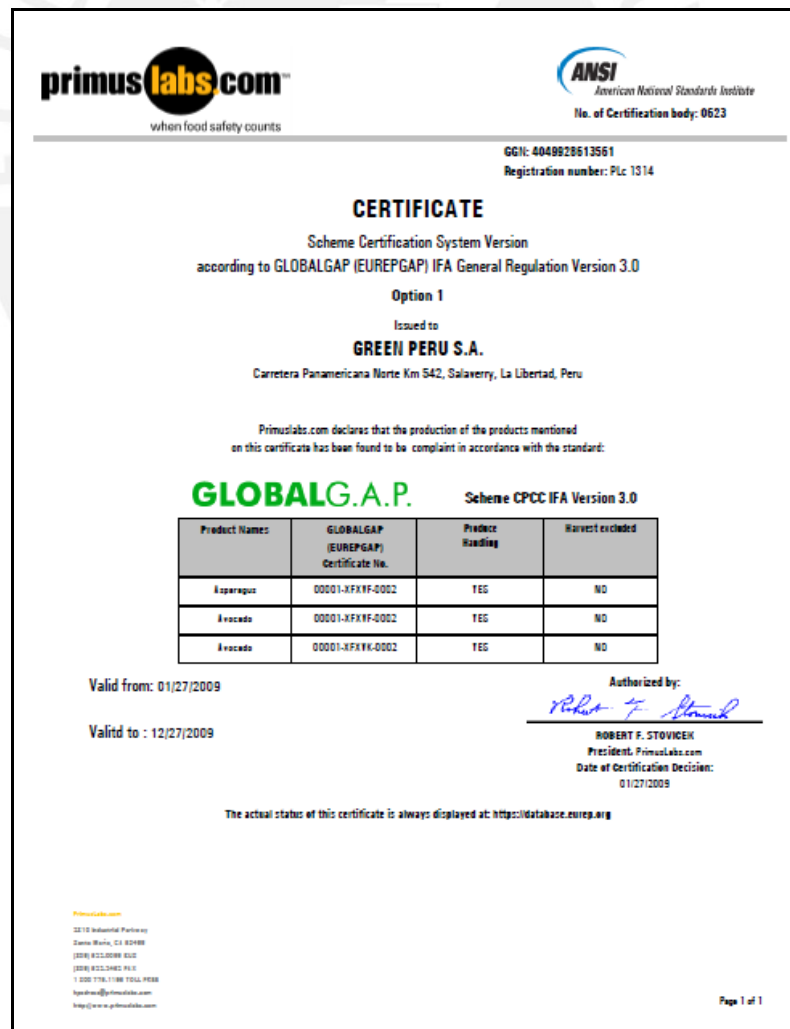


Figura 1.2: Certificado de calidad GLOBALG.A.P. (Fuente [9])



### 1.3.3. USDA GAP.

Es un programa de certificación establecido por el Departamento Federal de Agricultura de los Estados Unidos (USDA) basado en las prácticas BPA (GAP por sus siglas en inglés); pero que, a diferencia de las directrices establecidas por la FAO, se centran en la seguridad alimentaria y no abordan temas como el bienestar de los animales, la biodiversidad, o el uso de antibióticos y hormonas. [10]

En el ámbito nacional, empresas como Danper [8] y Green Perú [9] cuentan con certificaciones USDA GAP, otorgados por organismos certificadores tales como PRIMUSLABS.COM.

### 1.4. Declaración del marco problemático.

El proceso actual se ve restringido, principalmente, por el factor humano; este mismo, obliga a recolectar una cantidad limitada de muestras. Lo que conlleva a su vez, a que el análisis que se realice posteriormente, sea meramente estadístico y por tanto, sólo se estime el estado actual del cultivo. Asimismo, el optar por realizar un muestreo del área de los cultivos y no una evaluación total de la misma, implica riesgos tales como la detección tardía de una plaga y con ello la posibilidad de la pérdida parcial o total de toda la extensión de los cultivos.

Por otro lado, teniendo presentes las certificaciones internacionales que garantizan la calidad de los productos agrícolas, la información poco precisa que provee el monitoreo de cultivos se convierte en un gran limitante para acceder a dichas certificaciones y con ello acceder a otros mercados.

## CAPÍTULO 2

### TECNOLOGÍAS ORIENTADAS A LA AGRICULTURA DE PRECISIÓN

En el presente capítulo se parte de la definición del concepto de la agricultura de precisión. Asimismo, se exponen las principales tecnologías relacionadas a esta definición, tales como los Sistemas de Información Geográfica (SIG), algunas conceptualizaciones generales y, por último, el modelo teórico del sistema en donde se procesará, analizará y visualizará las imágenes adquiridas de manera remota.

#### **2.1. Definición de Agricultura de Precisión.**

La Agricultura de Precisión es considerada como un Sistema Alternativo Sostenible, utilizado en la producción agropecuaria, en el cual se emplean diferentes métodos o herramientas tecnológicas como por ejemplo, los Sistemas de Posicionamiento Geoespacial (GPS) y la Electrónica. Con el propósito de recopilar información sobre lo que sucede o puede suceder en los suelos y en los cultivos y, con dicha información, poder proceder a la toma de decisiones, que permita el incremento de los rendimientos, la disminución de los costos de producción y la reducción de los impactos ambientales. [11]

#### **2.2. Estado del Arte.**

##### **2.2.1. Presentación del asunto de estudio.**

La capacidad de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) para analizar y visualizar los ambientes agrícolas; es decir, proporcionar una adecuada georreferenciación de estos ambientes, ha demostrado ser muy beneficiosa en cuanto ha ayudado a los agricultores a aumentar la producción, reducir los costos y administrar sus tierras de manera más eficiente. [12]

Los productores hacen uso de los SIG para mejorar la gestión de sus explotaciones mediante la creación de informes y mapas que les dan una mejor perspectiva de sus operaciones. Las capacidades analíticas de los SIG ofrecen una variedad de opciones para la visualización de las condiciones de los cultivos, así como también la medición y el control de los efectos de la gestión agrícola.

Incluso, en algunos países desarrollados los administradores de las granjas también utilizan los SIG para poder acceder a programas de financiamiento de los gobiernos, simplificando lo que solía ser un proceso que requería mucho tiempo.

A continuación, se mostrarán algunos casos en los cuales las organizaciones agrícolas e incluso los gobiernos se benefician de la utilización de los SIG y como en alguno de esos casos se aplica la agricultura de precisión asociada a estos sistemas.

Finalmente, al apreciar cuan beneficioso ha sido para estas entidades el uso de estos sistemas, se buscará el método más idóneo para desarrollar un SIG enfocado en recopilar información de nuestras propias áreas agrícolas, en nuestro caso particular, haciendo uso de una pequeña aeronave controlada de manera remota.

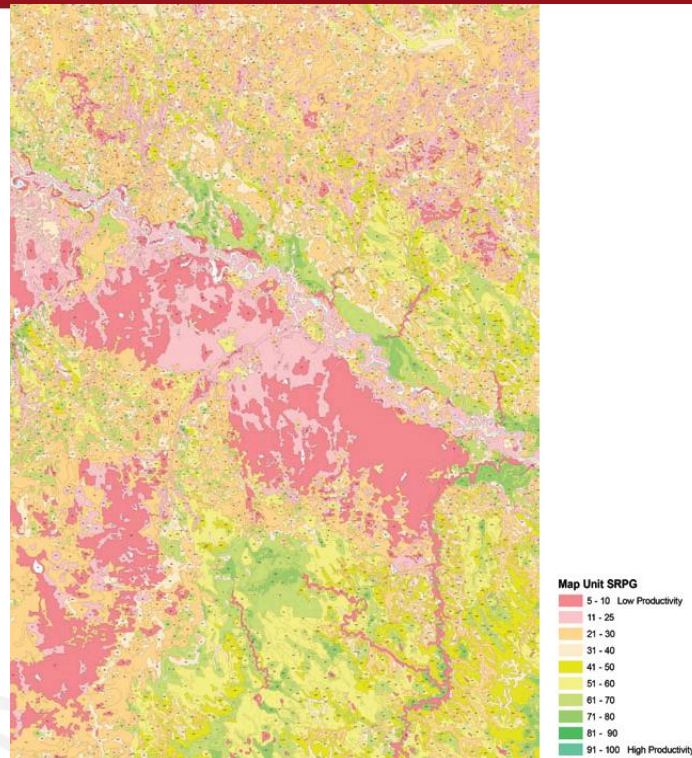
## **2.2.2. El Estado de la Investigación.**

### **1) Sistemas de Información Geográfica orientados a la Agricultura de Precisión.**

Vigilar las tendencias del mercado, la mejora de los rendimientos y la predicción del clima se encuentran entre las muchas responsabilidades necesarias para reducir el riesgo de pérdida y aumentar la rentabilidad. Con el análisis geoespacial y el modelamiento predictivo a su disposición, los agricultores tienen la capacidad de visualizar sus cultivos de manera de que puedan lograr una gestión precisa de sus negocios.

Por otro lado, hoy en día el acceso a los datos espaciales se ha convertido en una práctica agrícola esencial. Los organismos gubernamentales como el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA) y la Unión Europea cuentan con sitios web que proporcionan información valiosa para ayudar a los agricultores a entender mejor sus tierras y tomar decisiones estando mejor informados. Estos datos pueden ser usados para crear mapas inteligentes y con ello mejorar las prácticas de explotación. [13]

Por ejemplo, tal y como se puede observar en la figura 2.1, la generación de mapas con información agrícola permite llevar un mayor control del rendimiento de los cultivos analizados.



**Figura 2.1:** Estudio de suelos: Antelope County, Nebraska. (Fuente [13])

### **1.1) Sistema de Aplicación de Fertilizantes usando SIG/GPS orientados a la Agricultura de Precisión.**

Ravensdown, el mayor fabricante y distribuidor de fertilizantes de Nueva Zelanda, está utilizando la tecnología geoespacial para mejorar la forma en que los agricultores de dicho país gestionan sus recursos. Mediante el uso de SIG y del GPS se guía la aplicación de fertilizantes, con lo cual los agricultores están reduciendo la cantidad de desperdicio de recursos que potencialmente pueden causar escurrimientos nocivos en arroyos y canales. Al mismo tiempo, están reduciendo su gasto total de fertilizantes en un 10 por ciento por año.

Ravensdown ha trabajado con Eagle Technology Group para diseñar la solución que se basa en el software de ESRI ArcGIS. El sistema registra con exactitud dónde y cuánto fertilizante se ha aplicado a una zona determinada. Esta información se combina con fotos aeroespaciales y bases de datos de los campos de cultivo para crear una imagen vívida de la sostenibilidad de la explotación global del suelo.

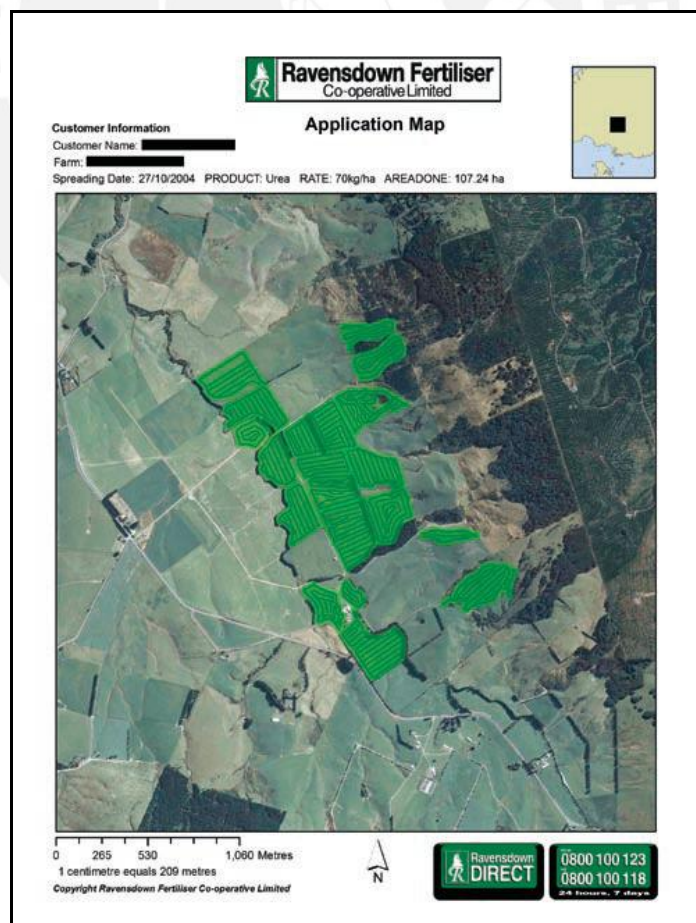
Una vez que el espacio en bruto y los datos de atributo son capturados de transmisores-receptores de GPS instalados en camiones, se transmiten de



forma inalámbrica y se cargan en el SIG en donde son procesados casi en tiempo real.

Como se observa en la figura 2.2, el códec del SIG crea una pantalla basada en mapas que muestra los datos de aplicación de fertilizantes como una serie de códigos de colores que se superponen en el mapa, dando una muy buena representación del proceso. Un beneficio adicional es que el sistema puede ser utilizado como prueba para verificar "la prueba de colocación." Con la tecnología geoespacial, es fácil demostrar que el abono se ha extendido de forma coherente con las mejores prácticas ambientales.

Sobre esta base, Ravensdown está planeando incorporar otras tecnologías. "Con el tiempo, queremos incorporar los SIG en nuestro sistema de cita para calcular la distancia por carretera entre nuestros depósitos y los campos para ser fertilizado," dice Mark McAtamney, CIO de Ravensdown. "La distancia es un componente importante de los costes a nuestros clientes." [13]



**Figura 2.2:** Ravensdown: Mapa de Aplicación. (Fuente [13])

## **2) Sistemas de Información Geográfica orientados a la Agricultura en los Gobiernos.**

Con la creciente conciencia pública de las prácticas agrícolas y las nuevas legislaciones, los ministerios de agricultura e instituciones no gubernamentales han buscado recopilar, administrar y difundir información con el fin de mejorar la conducta referida a estas actividades y para ello no existe medio más poderoso que la comunicación. Es en este punto que los SIG cobran vital importancia pues permiten el intercambio de información no solo interno, sino también entre el gobierno y los consumidores.

La industria agrícola utiliza SIG para afrontar los retos de la gestión agrícola, incluidos el cumplimiento normativo, el permiso de distribución, el seguimiento de la subvención y el manejo de las plagas. Para los productores la mejora en cuanto a la recopilación, el almacenamiento y el acceso a la información relacionada a estas actividades hace de los SIG una herramienta que proporciona un control absoluto de sus negocios. [13]

## **3) Sistemas de Información Geográfica de código abierto.**

En los últimos años los SIG de código abierto han jugado un papel fundamental en la adaptación de esta tecnología, ya sea estimulando nuevos enfoques experimentales, como también, facilitando el acceso a nuevos usuarios.

Dentro de la extensa gama de SIG de código abierto, cuyas principales características se pueden apreciar en los anexos de esta tesis, cabe destacar el GRASS; software que en la actualidad se usa tanto en el ámbito académico como en el comercial, e incluso ha sido adoptado por agencias gubernamentales y empresas de consultoría ambiental. Esto debido a que cuenta con versiones estables que permiten el manejo de los principales formatos de datos usados tanto en softwares SIG comerciales como de código abierto. [14]



### 3.1) GRASS SIG.

GRASS es el programa ideal para usar en aplicaciones ingenieriles y de planificación territorial. Al igual que otros paquetes de SIG, puede visualizar y manipular datos vectoriales. Puede también utilizarse para la actualización de mapas utilizando sus herramientas de digitalización. Dispone también de capacidad para manejar datos ráster (mapa de bits) y para realizar transformaciones entre los formatos ráster y vectorial. La potencia de GRASS reside en diversos campos: [15]

- Capacidad para leer y escribir mapas y tablas de datos en los formatos “propietario” más generalizados (incluyendo ARC/Info e Idris).
- Los usuarios que quieran escribir su propio código pueden hacerlo utilizando las librerías de GRASS disponibles y bien documentadas y el Manual del Programador de GRASS.
- La gran potencia de sus herramientas para el manejo de datos ráster, da a GRASS la capacidad para funcionar como un entorno de modelización espacial. Contiene más de 100 comandos para la gestión y análisis de datos ráster.
- Procesos superficiales como la transformación lluvia-escorrentía, construcción de líneas de flujo, análisis de estabilidad de taludes y análisis espacial son algunas de las posibles aplicaciones para ingeniería y planificación territorial. Puesto que muchas de las herramientas son multifuncionales los usuarios pueden crear sus propios mapas a partir del análisis de datos en GRASS. Además de la perspectiva convencional en 2 dimensiones, GRASS permite la incorporación de la tercera dimensión. Los mapas ráster, vectoriales y puntuales pueden utilizarse para la visualización.
- Las herramientas de GRASS permiten al usuario realizar animaciones con los datos espaciales disponibles, cambiando sobre la marcha las capas visualizadas. Los datos utilizados en visualizaciones 3D pueden también almacenarse como ficheros gráficos o como animaciones en formato MPEG.

- GRASS contiene un amplio conjunto de herramientas para el análisis y modelización hidrológica, análisis de cuencas, obtención de número de curva, análisis de avenidas, características de los cauces y redes de drenaje, etc.
- Otros programas en GRASS pueden generar gráficos y estadísticas.
- GRASS puede utilizar datos de campo como entrada de modelos o simular parámetros a partir de datos numéricos.
- Además de la versión tradicional en línea de comandos, se ha desarrollado una interfaz gráfica en Tcl/Tk, independiente de la plataforma, que facilita el acceso a los recursos del programa. Se trata de una interfaz intuitiva que facilita la visualización y manipulación de los datos del usuario. Prácticamente todos los programas disponibles en GRASS están disponibles en esta interfaz. Esta sencilla interfaz de usuario convierte al programa en la plataforma ideal para el aprendizaje del uso de Sistemas de Información Geográfica.

### **2.2.3. Síntesis del asunto de estudio.**

Como se ha mencionado los SIG han cobrado vital importancia en la gestión de la información, particularmente en la gestión relativa a la agricultura de precisión, permitiendo que un sinnúmero de gobiernos y empresas privadas mejoren la calidad de sus cultivos y administren de manera más eficiente sus recursos.

Por otro lado, la aplicación de SIG de código abierto ha permitido que sea más viable el desarrollo de proyectos de investigación. Por tal motivo, el presente documento parte del uso del software GRASS, cuyas características han sido mencionadas líneas arriba.

## **2.3. Conceptualizaciones Generales.**

### **2.3.1. Sensado Remoto.**

El sensado remoto o la teledetección, es la técnica de adquisición y posterior tratamiento de datos de la superficie terrestre desde sensores instalados en plataformas espaciales (aeronaves o satélites), en virtud de la interacción electromagnética existente entre la tierra y el sensor, siendo la fuente de radiación proveniente del sol (teledetección pasiva) o del propio sensor (teledetección activa). [16]

### **2.3.2. Georrectificación.**

La Georrectificación consiste en la toma de puntos de control en las imágenes, iguales a los de una cartografía existente para, a través de una aplicación polinómica, corregir la geometría original de las imágenes, otorgándoles la precisión geométrica de la cartografía de referencia. [17]

### **2.3.3. GeoTIFF.**

La especificación GeoTIFF es un estándar que permite integrar la información georreferenciada correspondiente a un archivo de imagen en formato TIFF. Dicha información puede provenir de sistemas de imágenes satelitales, fotografías aéreas escaneadas, mapas escaneados, modelos digitales de elevación, o ser el resultado de algún análisis geográfico. Su objetivo es poder vincular una imagen de mapa de bits a un espacio o proyección conocida. [18]

### **2.3.4. Sistema Geodésico Mundial 1984 (WGS 84).**

Es un sistema geodésico que define a su vez tres sistemas de coordenadas de referencia. El primero es un sistema cartesiano que se centra en el núcleo de la Tierra. El segundo y tercer sistema hacen uso de las coordenadas geográficas de latitud y longitud, o adicionalmente la de altitud. Ambos sistemas se basan en el elipsoide WGS 84. Dicho elipsoide es representado como una esfera ligeramente aplastada, la cual es elegida por sus propiedades matemáticas y por ser una aproximación razonable a la forma de la Tierra. [19]

### 2.3.5. Factor NDVI.

El factor NDVI es una fórmula usada para medir cuantitativamente el crecimiento de las plantas y la producción de biomasa a partir de datos satelitales multiespectrales. El factor NDVI se calcula con la fórmula 2.1.

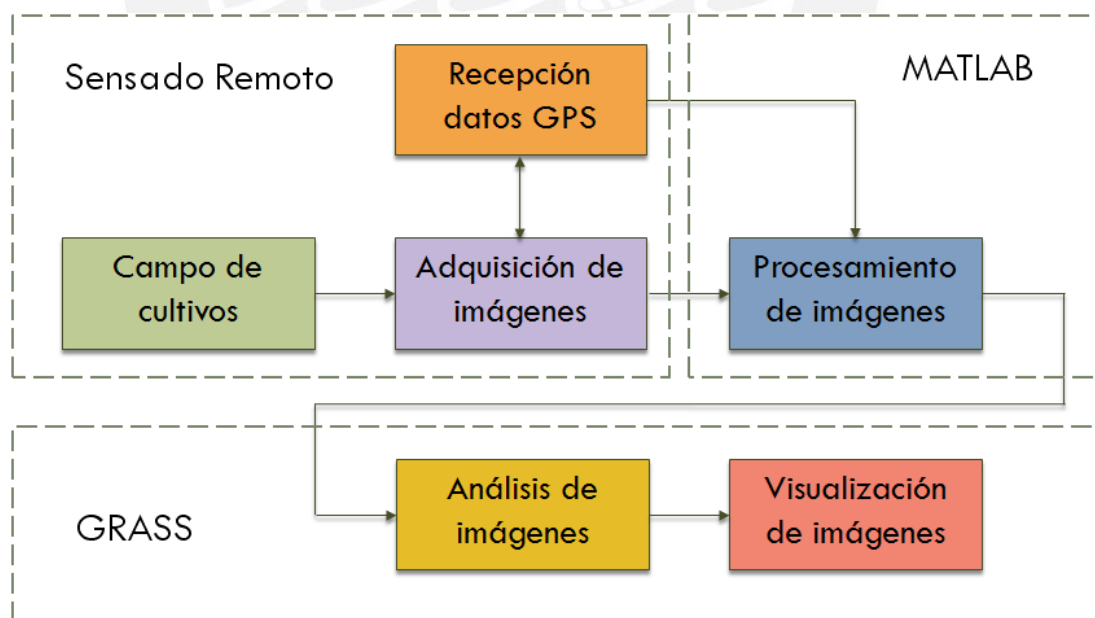
$$\text{NDVI} = (\text{NIR} - \text{RED}) / (\text{NIR} + \text{RED}) \quad (2.1)$$

Las variables RED y NIR se definen en base a las medidas de reflexión espectral adquiridas en las regiones del rojo visible y del infrarrojo cercano respectivamente. El factor NDVI varía en el rango de -1.0 a +1.0 y está directamente relacionado con el porcentaje de radiación absorbida fotosintéticamente. [20]

### 2.4. Modelo teórico.

#### 2.4.1. Elementos componentes y su interacción.

Se considera que el sistema en conjunto se puede describir con el diagrama de bloques de la figura 2.3.



**Figura 2.3:** Diagrama de bloques del sistema.

#### 2.4.1.1. Etapas de adquisición de imágenes y recepción de datos GPS.

Dado que se adquieren las imágenes multispectrales de los cultivos mediante un aeromodelo de manera remota, se tiene implementado un sistema de adquisición capaz de captar imágenes en las longitudes de onda del rojo visible (650 nm) y del infrarrojo cercano (850 nm). Este sistema cuenta para ello con sensores CMOS que permiten capturar imágenes en dichas longitudes. Por otro lado, debido a que se hace uso de sensores físicamente separados, se presenta un primer problema que es la no alineación perfecta de las cámaras.

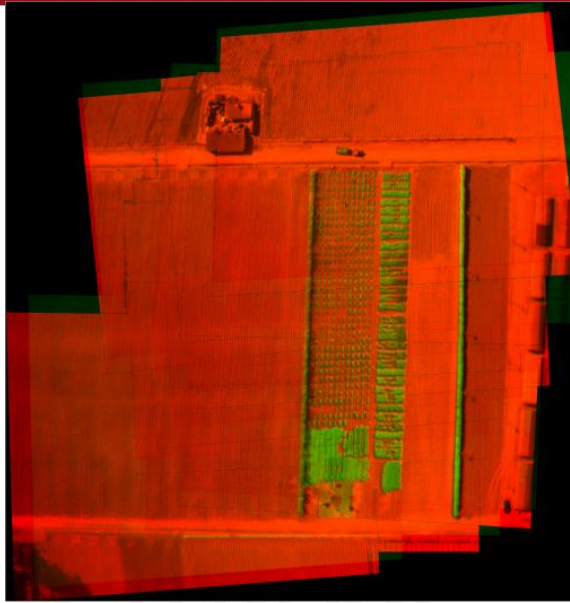
Adicionalmente a esto, el sistema cuenta con un dispositivo receptor de datos GPS vía USB marca Deluo, el cual hace uso del estándar WGS 84, mientras que el hardware encargado de adquirir y procesar las imágenes esta compuesto por un computador FITPC2. Este último puede apreciarse en la figura 2.5 una vez que se ha montando en el aeromodelo.



**Figura 2.5:** FITPC2 montado en el aeromodelo.

Paso seguido, para obtener una sola imagen de alta resolución en base a las diversas escenas capturadas, se aplican algoritmos que permiten unir diversas imágenes formando con ello un mosaico, integrando además la información de la banda roja y de la banda infrarroja cercana; tal y como se observa en la figura 2.6.





**Figura 2.6:** Mosaico generado con imágenes del CIP

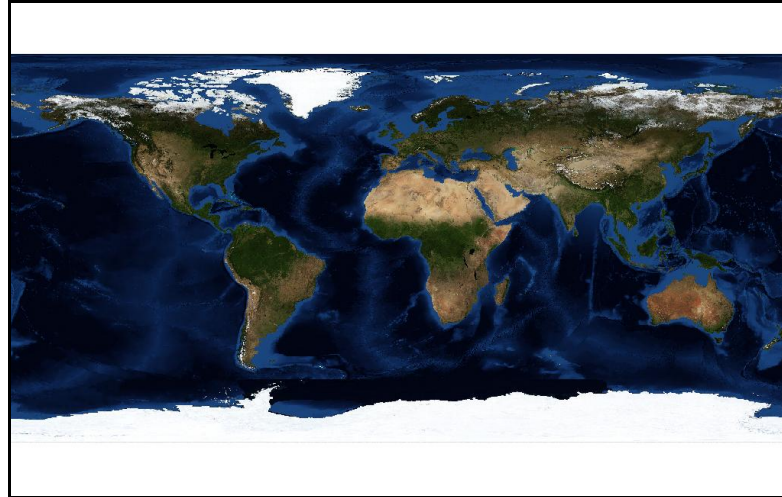
En la figura anterior (figura 2.6) se puede apreciar el campo de cultivo del CIP (Centro Internacional de la Papa). En ella se puede observar que, al querer contar con información en la banda roja e infrarroja cercana, se aplica la técnica de “falso color” que, en este caso en particular ha consistido en ingresar la información infrarroja en la correspondiente banda verde de una imagen RGB convencional, mientras que la información roja se mantiene en la banda roja de esta misma imagen y en la banda azul solo existe información nula. Es en este punto que las etapas previas a esta tesis terminan y por tanto es esta imagen “pseudo-RGB” la que se recibe como entrada junto con sus respectivos datos GPS.

#### **2.4.1.2. Etapa de procesamiento de imágenes.**

Una vez que se cuenta con una imagen con la información visual deseada, se busca asociarla con sus correspondientes coordenadas. Para lograr ello, un método común consiste en codificar los datos en una imagen GeoTIFF. El método considerado requiere de la instalación previa de los paquetes de “Libtiff” y de “Libgeotiff”, paquetes de bibliotecas, originalmente escritos por Sam Leffle, que incluyen herramientas UNIX usadas para la manipulación de archivos TIFF y GeoTIFF, respectivamente. [21].

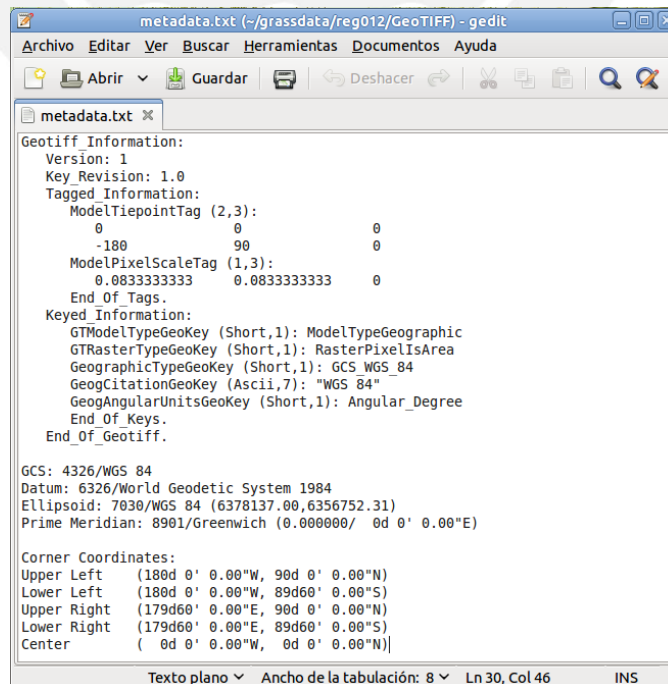


Para el presente trabajo, se toma como referencia la imagen “bluemarble.tif”, la cual es una imagen georreferenciada de la Tierra que se puede observar en la figura 2.7.



**Figura 2.7:** Imagen GeoTIFF “Blue Marble”. (Fuente [22])

Dicha imagen, cuenta además, con un archivo metadata.txt, en el cual se encuentra la información geoespacial correspondiente, generada siguiendo el formato de metadatos para una imagen GeoTIFF [23]. El contenido del archivo se puede observar en la figura 2.8.



```

metadata.txt (~/.grassdata/reg012/GeoTIFF) - gedit
Archivo Editar Ver Buscar Herramientas Documentos Ayuda
Abrir Guardar Deshacer
metadata.txt x
Geotiff Information:
Version: 1
Key Revision: 1.0
Tagged Information:
  ModelTiepointTag (2,3):
    0 0 0
    -180 90 0
  ModelPixelScaleTag (1,3):
    0.083333333 0.083333333 0
End Of Tags.
Keyed Information:
  GTModelTypeGeoKey (Short,1): ModelTypeGeographic
  GTRasterTypeGeoKey (Short,1): RasterPixelIsArea
  GeographicTypeGeoKey (Short,1): GCS_WGS_84
  GeogCitationGeoKey (Ascii,7): "WGS 84"
  GeogAngularUnitsGeoKey (Short,1): Angular_Degree
End Of Keys.
End_Of_Geotiff.

GCS: 4326/WGS 84
Datum: 6326/World Geodetic System 1984
Ellipsoid: 7830/WGS 84 (6378137.00,6356752.31)
Prime Meridian: 8901/Greenwich (0.000000/ 0d 0' 0.00"E)

Corner Coordinates:
Upper Left (180d 0' 0.00"W, 90d 0' 0.00"N)
Lower Left (180d 0' 0.00"W, 89d60' 0.00"S)
Upper Right (179d60' 0.00"E, 90d 0' 0.00"N)
Lower Right (179d60' 0.00"E, 89d60' 0.00"S)
Center ( 0d 0' 0.00"W, 0d 0' 0.00"N)

Texto plano Ancho de la tabulación: 8 Ln 30, Col 46 INS
  
```

**Figura 2.8:** Contenido del archivo metadata.txt.

Como se mencionó en la etapa de sensado, la imagen adquirida presenta algunas problemas a la hora de la captura, el primero, la no alineación de las cámaras, se corrigió en la generación del mosaico; sin embargo, existe un segundo problema que no se consideró que es la necesidad de georrectificar la imagen mediante un proceso de rotación, para ello se busca aprovechar los comandos del MATLAB y solo una vez se tenga una imagen con la orientación correcta se podrá pasar al último paso de esta etapa que es la georreferenciación.

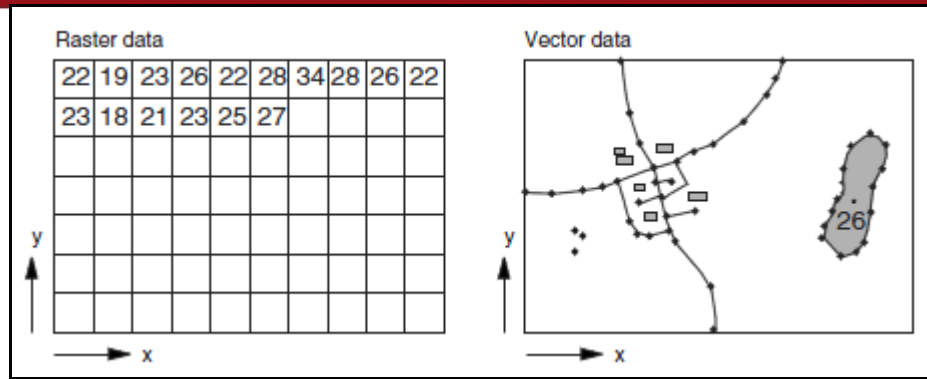
Ya con la imagen georrectificada, se necesita definir un archivo de texto adicional que depende de la imagen que se desee georreferenciar, este es conocido como “Word file” (TFW) y debe contener la siguiente información de coordenadas para el GeoTIFF:

- A: tamaño de píxel en la dirección x en unidades mapa / píxel.
- D: rotación alrededor del eje y.
- B: rotación alrededor del eje x.
- E: tamaño de píxel en la dirección y en unidades mapa / píxel.
- C: coordenada x de la esquina superior izquierda.
- F: coordenada y de la esquina superior izquierda.

Finalmente, con el archivo tfw definido, se hace uso del programa “geotifcp”, propio de “Libgeotiff” [24], el cual permite considerar el archivo metadata.txt como base para la generación del archivo GeoTIFF en donde se relacione la imagen adquirida y su correspondiente “Word file”. [21]

#### **2.4.1.3. Etapas de análisis y visualización de imágenes en GRASS.**

Primero, para utilizar eficazmente este SIG es necesario entender las propiedades básicas y aplicaciones de cada modelo de datos que soporta este tipo de sistemas. Ejemplos de estos pueden apreciarse en la figura 2.9.



**Figura 2.9:** Modelos de datos ráster y vectoriales. (Fuente [14])

### 1) Modelo de datos ráster.

Es una matriz regular de valores. Si los valores son asignados a una matriz de puntos, el ráster por lo general representa un campo continuo (altitud, temperatura, concentración de químicos). Si los valores están asignados a las celdas (unidades de área), representa una imagen (imagen de satélite, mapa escaneado, mapa vectorial convertido). Si los valores de celda representan categorías numéricas, uno o más atributos se pueden asignar a dicha celda usando una base de datos. En general, las celdas se organizan y se acceden por filas y columnas.

El modelo de datos ráster se utiliza a menudo para los subsistemas biofísicos de la geósfera como la elevación, temperatura, flujo de agua, o la vegetación. Sin embargo, también puede ser utilizado para los datos que suelen estar representados por líneas y polígonos como carreteras o las propiedades del suelo, especialmente para mapas escaneados. El modelo de datos ráster fue diseñado con un enfoque en el análisis, modelado y procesamiento de imágenes. Su principal ventaja es su simplicidad, tanto en términos de gestión de datos, así como los algoritmos para el análisis y modelado, incluyendo álgebra de mapas. [14]

## 2) Modelo de datos vectoriales.

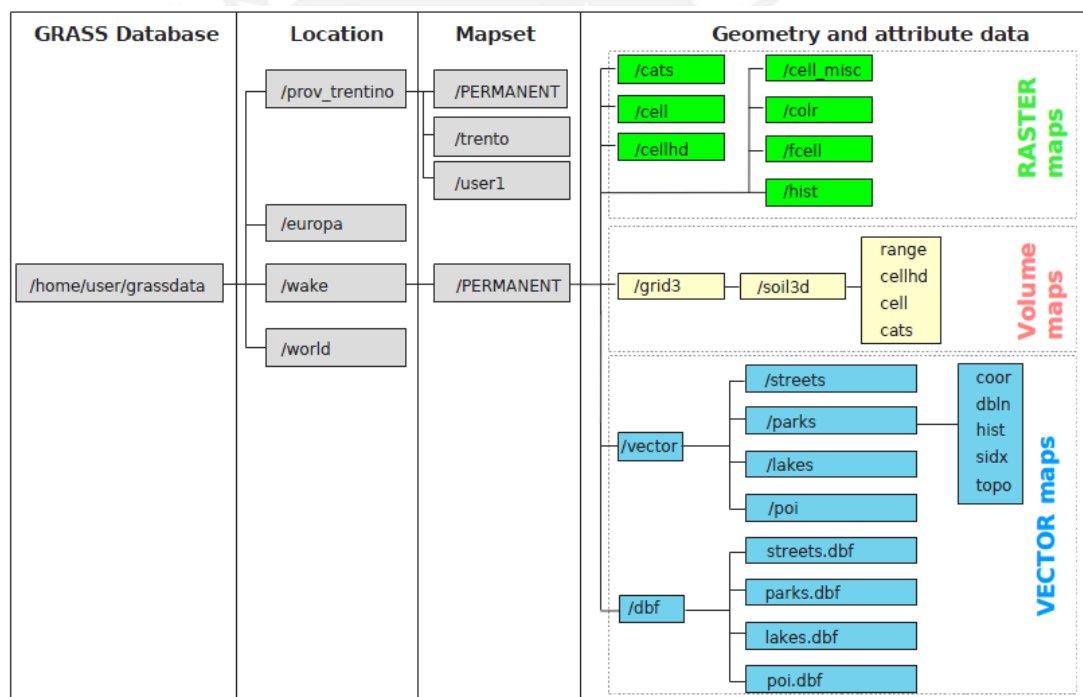
Se utiliza para representar áreas, líneas y puntos. El modelo de datos vectoriales se basa en la representación del arco-nodo. Un arco se almacena como una serie de puntos dados por  $(x,y)$  o  $(x,y,z)$ . Los dos extremos de un arco se llaman nodos. Los puntos a lo largo de una curva se llaman vértices. Dos pares consecutivos  $(x,y)$  o  $(x,y,z)$  definen un segmento del arco. Los arcos forman el nivel superior de las características del mapa: las líneas o áreas. A cada mapa se le asigna un número de categoría que se utiliza para vincular los datos descriptivos geométricos con datos de atributos.

Además de la información de coordenadas, el modelo de datos vectoriales a menudo incluye información sobre la topología de datos que describe la posición relativa en objetos el uno al otro.

Los datos vectoriales son más eficientes para las características que pueden ser descritas por las líneas de la geometría simple, como las carreteras, las redes de servicios públicos, los límites de propiedad. [14]

Por último, el GRASS tiene una manera muy particular de almacenar los archivos generados en él. En primer lugar, estos archivos se almacenan en un directorio que por lo general lleva el nombre de "grassdata". Dentro de este directorio, los datos de GRASS se organizan por proyectos en subdirectorios llamados LOCATIONS (regiones de trabajo), tal y como se especifica en la figura 2.10. Cada LOCATION se define por su sistema de coordenadas, su proyección cartográfica y sus fronteras geográficas. Los subdirectorios y los archivos de definición de un LOCATION se crean automáticamente cuando GRASS se inicia por primera vez con una nueva región de trabajo. Además, cada una de ellos pueden tener varios MAPSETS (subdirectorios de la localización) que se utilizan para subdividir el proyecto en diferentes temas, subregiones, o como espacios de trabajo para los miembros individuales del equipo de trabajo. Es así que, además del acceso a su propio directorio de mapas, cada usuario puede leer los mapas en los MAPSETS de otros usuarios, pero puede modificar o eliminar solo los mapas en su propio directorio. Todos los MAPSETS incluyen un archivo WIND que almacena el límite actual de valores de las coordenadas y la resolución de la

trama seleccionada. Al crear una nueva ubicación o región de trabajo, GRASS automáticamente crea un MAPSET especial llamado PERMANENT diseñado para almacenar los datos básicos del proyecto, su extensión espacial predeterminada en el archivo DEFAULT\_WIND y coordinar las definiciones del sistema. Sólo el propietario del directorio de mapas PERMANENT puede añadir, modificar o eliminar sus datos, sin embargo, estos datos pueden ser consultados, analizados y copiados por otros usuarios en sus propios MAPSETs. Así pues, la organización interna y la gestión del LOCATION, los MAPSETs y los mapas se debe dejar a GRASS. Las operaciones tales como el cambio de nombre o copiar mapas ráster y mapas vectoriales involucran a varios archivos internos y siempre debe hacerse a través de comandos propios de GRASS.



**Figura 2.10:** Organización de directorios en GRASS. (Fuente [14])

### CAPÍTULO 3

## APLICACIÓN DE UN SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA COMO SOLUCIÓN A LA PROBLEMÁTICA

En el presente capítulo se exponen los objetivos de la investigación, así como también los requerimientos del sistema. Por otro lado, se describen y se justifican las tareas a realizarse en esta investigación seguidas de una serie de pseudocódigos en donde se visualizará el procedimiento planteado.

### **3.1. Objetivos de la investigación.**

#### **3.1.1. Objetivo principal.**

Desarrollar una interfaz de usuario con la cual el agricultor u operario pueda, a través de los resultados del análisis de las imágenes multiespectrales capturadas desde un aeromodelo, realizar una óptima gestión de sus tierras.

#### **3.1.2. Objetivos específicos.**

- Evaluar la factibilidad del uso del GRASS como software de procesamiento y visualización de imágenes georreferenciadas.
- Integrar la información disponible de imágenes georreferenciadas y datos GPS al sistema de información.
- Diseñar una interfaz de usuario que muestre la información útil de manera visual valiéndose del GRASS.

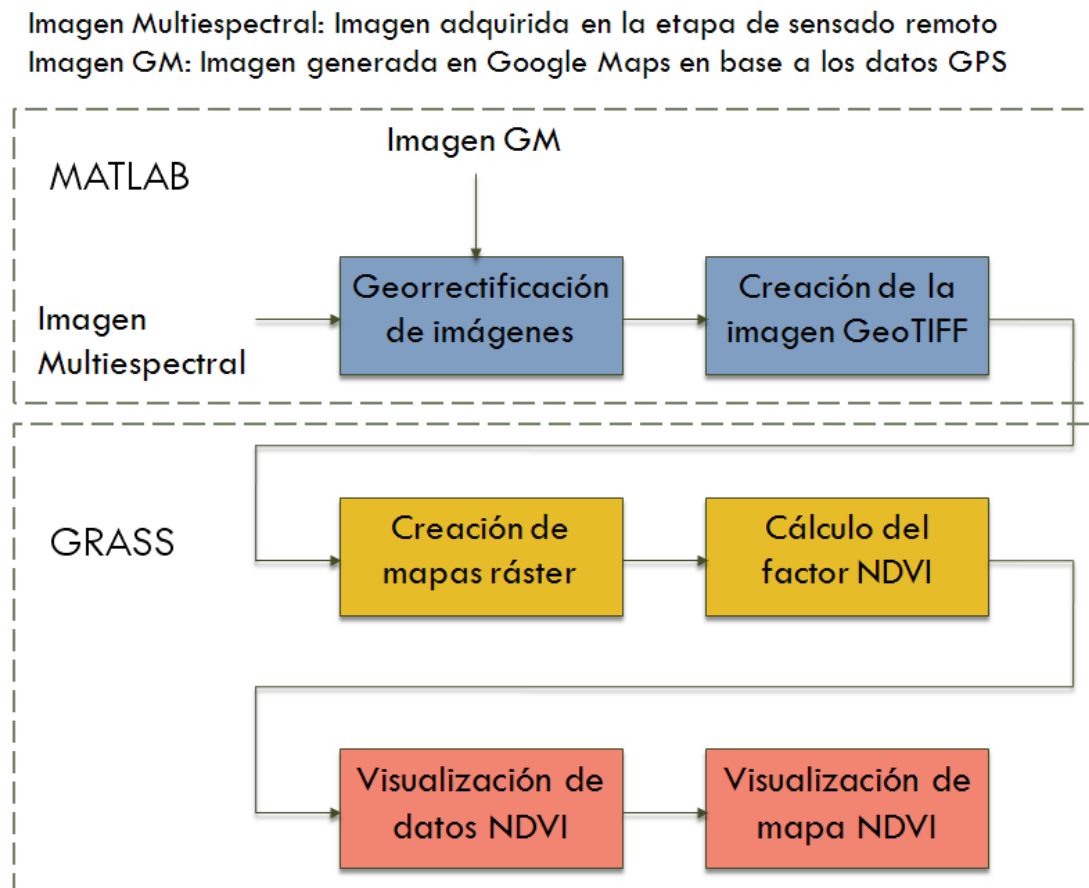
### **3.2. Requerimientos del sistema.**

Dado que se cuentan con imágenes multiespectrales y datos GPS, ambos adquiridos en la etapa de sensado remoto, pero que no se encuentran relacionados entre sí, se requiere el uso de un software que permita realizar la integración de la información adquirida en base a la generación de imágenes georreferenciadas y que, una vez logrado esto, se pueda realizar el cálculo del índice vegetativo conocido como NDVI.



### 3.3. Diagrama de bloques.

Como se mencionó en el capítulo anterior, el presente tema de estudio comprende las etapas de procesamiento, análisis y visualización de imágenes del sistema descrito en la figura 2.3. A continuación, en la figura 3.1, se puntualizan las tareas que, en líneas generales, le corresponden a dichas etapas:



**Figura 3.1:** Etapas de procesamiento, análisis y visualización de imágenes.

#### 3.3.1. Georrectificación de imágenes.

Como se mencionó en el capítulo anterior, la Georrectificación se aplica con el objetivo de otorgarle precisión geométrica a las imágenes adquiridas; en nuestro caso, las imágenes multiespectrales adquiridas en la etapa de sensado remoto presentan una orientación distinta a la de la cartografía de referencia obtenida en Google Maps.

### **3.3.2. Creación de la imagen GeoTIFF.**

Habiendo corregido la orientación de la imagen multiespectral, también se hace necesario relacionar cada punto de la misma con su correspondiente coordenada GPS. Para lograr esto, se hace uso de un formato de imagen estándar GeoTIFF el cual, como se explicó en el capítulo anterior, permitirá generar una nueva imagen que pueda ubicarse adecuadamente en la región de interés.

### **3.3.3. Creación de mapas ráster.**

Con la imagen GeoTIFF generada, se busca poder usar las herramientas propias del SIG GRASS. Para ello se hace necesario convertir los datos GeoTIFF en un mapa de bits o mapa ráster, el cual pueda ser interpretado dentro de este tipo de software.

### **3.3.4. Cálculo del factor NDVI.**

Haciendo uso de los comandos propios del GRASS, se puede aplicar directamente la fórmula para hallar el factor NDVI y con ello, generar un mapa ráster que cuente con dicha información. Adicionalmente, el GRASS ya cuenta con una paleta de colores asociada a este factor y por tanto se puede tener una imagen que siga los estándares y que permita una correcta interpretación de la información presentada.

### **3.3.5. Visualización de datos NDVI.**

Previo a la visualización del mapa, se hace necesario presentar una leyenda en donde se relacione visualmente los datos NDVI cuantitativos con los colores del mapa presentado. Por otro lado, para que la interpretación de estos valores no se haga engorrosa se busca presentar, textualmente, los valores que distinguen la vegetación sana, del suelo árido o de la presencia de agua.

### **3.3.6. Visualización de mapa NDVI.**

Como se mencionó, el GRASS ya cuenta con una paleta de colores NDVI, asignada a los valores propios de dicho factor; es decir, valores que varían entre -1.0 y +1.0. Por otro lado, la imagen que se visualiza ya esta

georreferenciada y por tanto se busca visualizar en pantalla tanto el mapa NDVI como las coordenadas correspondientes a cada punto del mismo.

### **3.4. Pseudocódigos.**

A continuación, se mencionan los pasos a seguir en cada una de las tareas a realizar en el procedimiento planteado. Dichos pasos se detallarán en el capítulo 4.

#### **3.4.1. Georrectificación de imágenes.**

**Paso 1.** Convertir la imagen BMP a TIF.

**Paso 2.** Ingresar la imagen multiespectral.

**Paso 3.** Ingresar los datos GPS.

**Paso 4.** Ingresar la imagen de Google Maps.

**Paso 5.** Calcular el ángulo de rotación.

**Paso 6.** Rotar la imagen multiespectral.

#### **3.4.2. Creación de la imagen GeoTIFF.**

**Paso 1.** Calcular la relación mapa / píxeles.

**Paso 2.** Calcular la coordenada superior izquierda.

**Paso 3.** Definir los parámetros TFW.

**Paso 4.** Crear el archivo TFW.

**Paso 5.** Generar la imagen GeoTIFF.

#### **3.4.3. Creación de mapas ráster.**

**Paso 1.** Ingresar la imagen GeoTIFF.

**Paso 2.** Crear el mapa ráster.

**Paso 3.** Definir los parámetros TFW.

#### **3.4.4. Cálculo del factor NDVI.**

**Paso 1.** Calcular la resta (NIR-RED).

**Paso 2.** Calcular la suma (NIR+RED).

**Paso 3.** Calcular el cociente resta / suma.

**Paso 4.** Asignar la paleta de colores NDVI.

#### **3.4.5. Visualización de datos NDVI.**

**Paso 1.** Iniciar el módulo o ventana.

**Paso 2.** Visualizar la leyenda del mapa NDVI.

**Paso 3.** Visualizar la fecha de captura de las imágenes.

**Paso 4.** Visualizar el título de la información presentada.

**Paso 5.** Visualizar el nombre del lugar de captura de las imágenes.

**Paso 6.** Visualizar, textualmente, la interpretación numérica de la leyenda.

#### **3.4.6. Visualización de mapa NDVI.**

**Paso 1.** Iniciar el módulo o ventana.

**Paso 2.** Visualizar el mapa NDVI.

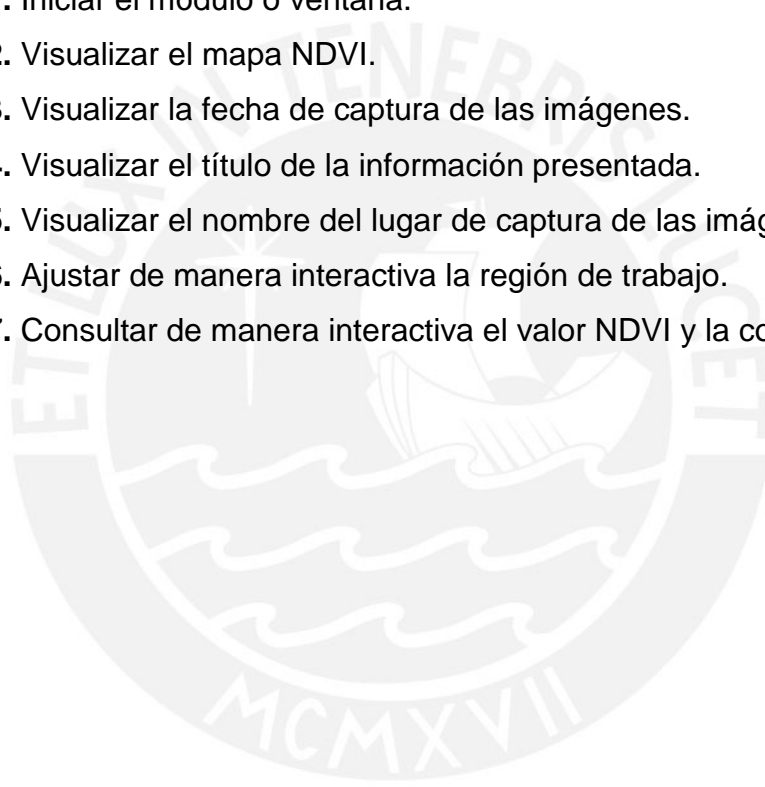
**Paso 3.** Visualizar la fecha de captura de las imágenes.

**Paso 4.** Visualizar el título de la información presentada.

**Paso 5.** Visualizar el nombre del lugar de captura de las imágenes.

**Paso 6.** Ajustar de manera interactiva la región de trabajo.

**Paso 7.** Consultar de manera interactiva el valor NDVI y la coordenada GPS.



## CAPÍTULO 4

### PRUEBAS Y RESULTADOS

En el presente capítulo se mencionan los requerimientos mínimos de hardware y de software necesarios para el desarrollo de la investigación. Asimismo, se describe el equipo usado en dicha investigación y las características de las imágenes procesadas en la misma. Por otro lado, se presenta el desarrollo de la solución planteada en el capítulo anterior. Con dicho propósito, se muestran los códigos realizados tanto en MATLAB como en el SIG GRASS. Por último, se analizan los resultados obtenidos en base a las imágenes generadas.

#### **4.1. Requerimientos mínimos de hardware y de software.**

Requerimientos mínimos para compilar GRASS 6: [25]

- Sistema operativo basado en UNIX (p.e. Linux)
- 500 Mbytes de espacio libre en el disco duro.
- 32 Mbytes de RAM.

Paquetes de bibliotecas y aplicaciones adicionales:

- Libtiff.
- Libgeotiff.
- ImageMagick.

#### **4.2. Descripción del hardware y del software utilizado.**

Para el desarrollo de la presente investigación se hizo uso de un computador con las siguientes características:

- Sistema operativo Ubuntu 10.10.
- Procesador Intel Celeron D 430 1.8GHz
- 896 Mbytes de RAM.
- 60 Gbytes de disco duro

### 4.3. Descripción de las imágenes adquiridas.

Las imágenes consideradas para el desarrollo de la solución fueron adquiridas el 16 de Septiembre del 2010. Dichas imágenes corresponden a parcelas de cultivo de caña, pertenecientes a la empresa Agro Industrial Paramonga, las cuales se ubican a la altura del kilómetro 250 de la Panamericana Norte [26]. Por otro lado, para facilitar el análisis de los resultados, se considera también una porción de una imagen satelital, correspondiente a la misma región, adquirida el 30 de Octubre del año en curso.

### 4.4. Desarrollo de la solución.

#### 4.4.1. Procesamiento de imágenes en MATLAB.

##### 4.4.1.1. Georrectificación de imágenes.

A continuación, se detalla el código correspondiente al programa en MATLAB:

Se convierte la imagen multiespectral de formato BMP a formato TIF, haciendo uso del comando *mogrify* propio del software Imagemagick en UNIX.

```
system('mogrify -format reg012.tif *reg012.bmp');
```

Se ingresa la imagen multiespectral que se desea georrectificar, con el comando *imread*.

```
ipar=imread('reg012.tif');
```

Se guardan las dimensiones de la imagen.

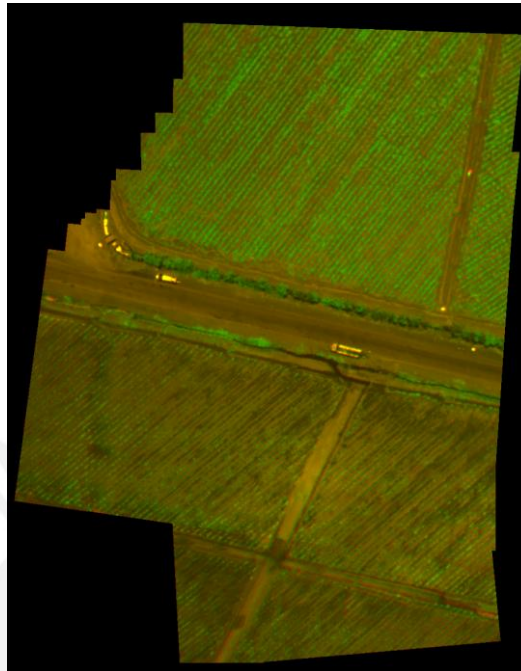
```
[vpxel,hpxel,bands]=size(ipar);
```

Se visualiza la imagen multiespectral y se ubican los puntos de interés, es decir, los puntos cuyas coordenadas GPS son conocidas (puntos de control).

```
figure(1);  
imshow(ipar);  
[X,Y]=ginput(2)  
x1=round(X(1,1)); y1= round(Y(1,1));  
x2=round(X(2,1)); y2= round(Y(2,1));
```



Los valores hallados en la figura 4.1 mediante el uso del comando *ginput* son redondeados con el comando *round* y guardados para usarlos en las operaciones posteriores.



**Figura 4.1:** Imagen multiespectral correspondiente a Paramonga.

Se ingresan los datos GPS correspondientes a los puntos de control de la imagen considerando sus respectivos signos.

```
w1=-77.66583; s1=-10.64695;
w2=-77.66552; s2=-10.64796;
```

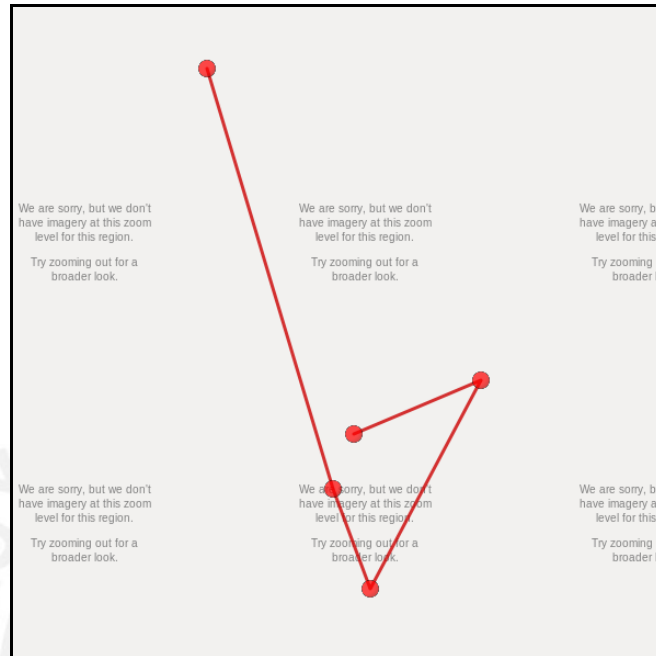
Se ingresa la imagen obtenida de Google Maps (imagen GM), en donde se indican los mismos puntos de control de la imagen multiespectral pero considerando su correcta orientación.

```
igm=imread('reg012.png');
```

Se visualiza la imagen GM y se ubican los puntos de control de dicha imagen, los mismos que corresponden a la imagen multiespectral original.

```
figure(2)
imshow(igm);
[X,Y]=ginput(2)
x3=round(X(1,1)); y3= round(Y(1,1));
x4=round(X(2,1)); y4= round(Y(2,1));
```

Los valores hallados en la figura 4.2 mediante el uso del comando *ginput* son redondeados con el comando *round* y guardados para usarlos en las operaciones posteriores.



**Figura 4.2:** Imagen obtenida en Google Maps en base a los datos GPS.

Se calcula el ángulo de rotación ( $\alpha$ ), el cual indica que tanto debe girarse la imagen multiespectral original para alcanzar la orientación de la imagen GM.

Se calcula el ángulo entre los puntos de control de la imagen multiespectral, es decir la orientación actual.

$$\alpha_{RGB} = \text{atan}((y_1 - y_2) / (x_1 - x_2));$$

Se calcula el ángulo entre los puntos de control de la imagen GM; es decir, la orientación deseada.

$$\alpha_{GM} = \text{atan}((y_3 - y_4) / (x_3 - x_4));$$

Se calcula la diferencia de los ángulos anteriores y con ello los grados que se necesitan girar.

$$\alpha = (\alpha_{GM} - \alpha_{RGB}) * 180 / \pi;$$

Se procede a realizar la rotación de la imagen multiespectral, para ello se utiliza el comando *imrotate*; sin embargo, antes de usarlo se necesita

generar una nueva imagen que contenga la información de la imagen multiespectral original, pero cuyo centro sea el segundo punto de control. Se consideran entonces cuatro casos, estos dependen de la ubicación del segundo punto de control dentro de la imagen multiespectral original. Es decir, si dividimos esta en cuatro cuadrantes, se necesita saber en cual de estos se encuentra dicho punto de control.

```
if ((x2<=(hpixel/2))&(y2<=(vpixel/2)))
    ii=[zeros(vpixel,(hpixel-2*x2),bands) ipar];
    iii=[zeros((vpixel-2*y2),2*(hpixel-x2),bands);ii];
```

El primer caso, genera una nueva imagen agregando ceros al lado izquierdo de la imagen multiespectral original. Paso seguido, se terminan de agregar ceros en la parte superior de la segunda imagen.

```
elseif ((x2>(hpixel/2))&(y2<=(vpixel/2)))
    ii=[ipar zeros(vpixel,(2*x2-hpixel),bands)];
    iii=[zeros((vpixel-2*y2),2*x2,bands);ii];
```

El segundo caso, genera una nueva imagen agregando ceros al lado derecho de la imagen multiespectral original. Paso seguido, se terminan de agregar ceros en la parte superior de la segunda imagen.

```
elseif ((x2<=(hpixel/2))&(y2>(vpixel/2)))
    ii=[zeros(vpixel,(hpixel-2*x2),bands) ipar];
    iii=[ii;zeros((2*y2-vpixel),2*(hpixel-x2),bands)];
```

El tercer caso, genera una nueva imagen agregando ceros al lado izquierdo de la imagen multiespectral original. Paso seguido, se terminan de agregar ceros en la parte inferior de la segunda imagen.

```
elseif ((x2>(hpixel/2))&(y2>(vpixel/2)))
    ii=[ipar zeros(vpixel,(2*x2-hpixel),bands)];
    iii=[ii;zeros((2*y2-vpixel),2*x2,bands)];
end
```

Finalmente, el cuarto caso, genera una nueva imagen agregando ceros al lado derecho de la imagen multiespectral original. Paso seguido, se terminan de agregar ceros en la parte inferior de la segunda imagen.

Se gira la última imagen generada tantos grados como sea necesario para alcanzar la orientación deseada.

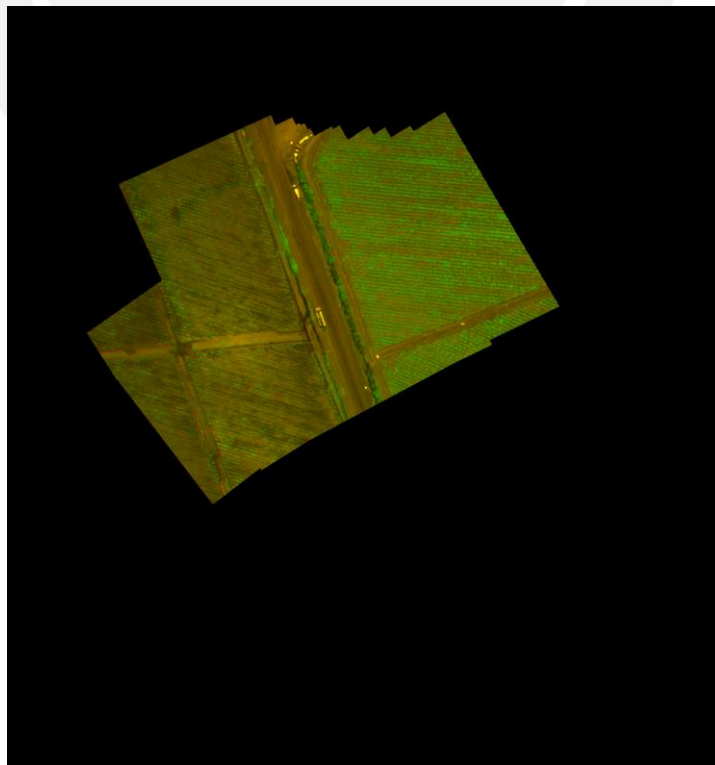
```
iiirot=imrotate(iii,-alpha);
```

Dado que el comando *imrotate* gira la imagen en el sentido inverso a las agujas del reloj, se ejecuta el mismo considerando un ángulo “alpha” negativo.

Se visualiza la imagen rotada y se ubican los puntos de control de dicha imagen, los mismos que originalmente pertenecieron a la imagen multiespectral.

```
figure(4);  
imshow(iiirot);  
[X,Y]=ginput(2)  
x5=round(X(1,1)); y5= round(Y(1,1));  
x6=round(X(2,1)); y6= round(Y(2,1));
```

Los valores hallados en la figura 4.3 mediante el uso del comando *ginput* son redondeados con el comando *round* y guardados para usarlos en las operaciones posteriores.



**Figura 4.3:** Imagen multiespectral georrectificada.

Se guarda la imagen rotada en un archivo con extensión TIF mediante el comando *imwrite*.

```
imwrite(iiirot,'reg012r.tif');
```

#### 4.4.1.2. Creación de la imagen GeoTIFF.

A continuación, se detalla el código correspondiente al programa en MATLAB:

Se calcula la relación mapa / píxeles (KW,KS) en base a los datos GPS y a los valores de los puntos de control correspondientes. Estos últimos hallados con el comando *ginput*.

Se calcula la relación entre los datos GPS y los puntos de control en el eje horizontal (KW).

```
dW=abs(w1)-abs(w2);
dX=x5-x6;
KW=dW/dX;
```

Se calcula la relación entre los datos GPS y los puntos de control en el eje vertical (KS).

```
dS=abs(s1)-abs(s2);
dY=y5-y6;
KS=dS/dY;
```

Se calculan los datos GPS que le corresponderían a la coordenada superior izquierda ( $W_i, S_i$ ).

```
wx=abs(KW)*x5;
Wi=w1-wx;
sx=abs(KS)*y5;
Si=s1+sx;
```

Este último cálculo toma como referencia los valores del primer punto de control tanto en píxeles como en datos GPS.

Se definen los parámetros necesarios para la creación del archivo con extensión TFW (Word file).

A=KS;	%A: tamaño de píxel en la dirección (mapa / píxel)
D=0;	%D: rotación alrededor del eje y
B=0;	%B: rotación alrededor del eje x
E=KW;	%E: tamaño de píxel en la dirección (mapa / píxel)
C=Wi;	%C: coordenada x de la esquina superior izquierda
F=Si;	%F: coordenada y de la esquina superior izquierda

Se crea un archivo TFW con el comando *fopen* que contenga los parámetros antes definidos.

```
fid=fopen('reg012.tfw','w');
```

Se les da el formato adecuado a cada uno de los parámetros con el comando *fprintf*, de manera que se tengan tantos dígitos significativos como sean necesarios para no redondear ninguno de los valores correspondientes a dichos parámetros.

```
fprintf(fid,'% .10f\n',A);
fprintf(fid,'% .10f\n',D);
fprintf(fid,'% .10f\n',B);
fprintf(fid,'% .10f\n',E);
fprintf(fid,'% .10f\n',C);
fprintf(fid,'% .10f\n',F);
fclose(fid);
```

Finalmente, se genera la imagen GeoTIFF haciendo uso del programa *geotifcp* en Ubuntu.

```
system('geotifcp -e reg012.tfw -g metadata.txt reg012r.tif reg012geo.tif');
```

Para dicha creación, se considera el archivo TFW generado, la imagen multispectral georectificada y un archivo de texto que contiene la metadata correspondiente al estándar cartográfico WGS84.

#### 4.4.2. Análisis de imágenes en GRASS.

A continuación, se detalla el código correspondiente al programa en GRASS: Se ingresa una imagen GeoTIFF mediante el comando *r.in.gdal* convirtiéndola en un mapa de datos ráster; además, se define, en base a esta imagen, la región de trabajo o localización.



```
r.in.gdal
input=/home/microsoft/grassdata/paramonga/GeoTIFF/reg012geo.TIF
output=012 location=paramonga
```

Con lo anterior se generan tres mapas ráster correspondientes a las tres capas de la imagen original: 012.red, 012.green (en donde está la información de la capa NIR) y 012.blue.

Se calcula el factor NDVI con  $ndvi = (nir - red) / (nir + red)$ , pero como este código se ejecuta desde la terminal y en esta no se admite el uso de los paréntesis, se tienen que calcular la resta y la suma de manera independiente.

Se calcula la resta *green* – *red* con el comando *r.mapcalculator*.

```
r.mapcalculator amap=012.green@PERMANENT
bmap=012.red@ PERMANENT formula=A-B outfile=012.resta
```

Se calcula la suma *green* – *red* con el comando *r.mapcalculator*.

```
r.mapcalculator amap=012.green@ PERMANENT
bmap=012.red@ PERMANENT formula=A+B outfile=012.suma
```

Se calcula el cociente *resta* / *suma* con el comando *r.mapcalculator*.

```
r.mapcalculator amap=012.resta@ PERMANENT
bmap=012.suma@ PERMANENT formula=1.0*A/B outfile=012.ndvi
```

Se multiplica el cociente calculado por un factor de 1.0 pues esto permite que los valores que se obtengan posean dígitos decimales.

Asigno los colores de la paleta NDVI con el comando *r.colors* al mapa ráster generado.

```
r.colors map=012.ndvi@ PERMANENT color=ndvi
```

#### 4.4.3. Visualización de imágenes en GRASS.

A continuación, se detalla el código correspondiente al programa en GRASS: Se abre un primer módulo o ventana de GRASS con el comando *d.mon* que permite abrir hasta un máximo de 8 módulos al mismo tiempo, desde el módulo x0 hasta el x7.

```
d.mon X0
```

Se muestra la leyenda del mapa NDVI con el comando *d.legend* en el último módulo abierto.

```
d.legend map=012.ndvi@PERMANENT color=black lines=0 thin=1  
labelnum=7 at=10,70,5,8 -s
```

Se muestra un texto con el comando *d.text* que indique la fecha del día que se capturaron las imágenes, ubicándolo convenientemente en la última ventana abierta.

```
d.text -s 'text=16 de Septiembre del 2010' size=12 color=0:0:0 at=5,94  
align=ll rotation=0 linespacing=0.25 --q
```

Se muestra un texto con el comando *d.text* que indique el título de la información presentada, ubicándolo convenientemente en la última ventana abierta.

```
d.text -s 'text=Leyenda de datos NDVI' size=12 color=0:0:0 at=5,90  
align=ll rotation=0 linespacing=0.25 --q
```

Se muestra un texto con el comando *d.text* que indique la región en donde se han tomado las imágenes, ubicándolo convenientemente en la última ventana abierta.

```
d.text -s 'text=Paramonga' size=12 color=0:0:0 at=5,86 align=ll rotation=0  
linespacing=0.25 -q
```

Se muestran una serie de textos con el comando *d.text* que indiquen las consideraciones que se han de tener para interpretar cuantitativamente la leyenda del mapa NDVI, ubicándolos convenientemente en la última ventana abierta.

```

d.text -s 'text=Interpretacion numerica de valores NDVI' size=12
color=0:0:0 at=5,78 align=ll rotation=0 linespacing=0.25 -q
d.text -s 'text=Considerar que:' size=12 color=0:0:0 at=20,70 align=ll
rotation=0 linespacing=0.25 --q
d.text -s 'text=@ Valores positivos altos indican' size=12 color=0:0:0
at=20,66 align=ll rotation=0 linespacing=0.25 --q
  d.text -s 'text= presencia de vegetacion sana' size=12 color=0:0:0
at=20,62 align=ll rotation=0 linespacing=0.25 --q
d.text -s 'text=@ Valores cercanos a cero indican' size=12 color=0:0:0
at=20,58 align=ll rotation=0 linespacing=0.25 --q
d.text -s 'text= presencia de suelo arido' size=12 color=0:0:0 at=20,54
align=ll rotation=0 linespacing=0.25 --q
d.text -s 'text=@ Valores negativos bajos indican' size=12 color=0:0:0
at=20,50 align=ll rotation=0 linespacing=0.25 --q
d.text -s 'text= presencia de agua' size=12 color=0:0:0 at=20,46 align=ll
rotation=0 linespacing=0.25 --q

```

Se abre un segundo módulo o ventana de GRASS con el comando *d.mon* que permite abrir hasta un máximo de 8 módulos al mismo tiempo, desde el módulo x0 hasta el x7.

```
d.mon X1
```

Se muestra el mapa NDVI con el comando *d.rast* en el último módulo abierto.

```
d.rast map=012.ndvi@PERMANENT -o
```

Se muestra un texto con el comando *d.text* que indique la fecha del día que se capturaron las imágenes, ubicándolo convenientemente en la última ventana abierta.

```
d.text -s 'text=16 de Septiembre del 2010' size=12 color=0:0:0 at=5,94
align=ll rotation=0 linespacing=0.25 --q
```

Se muestra un texto con el comando *d.text* que indique el título de la información presentada, ubicándolo convenientemente en la última ventana abierta.

```
d.text -s 'text=Mapa NDVI' size=12 color=0:0:0 at=5,90 align=ll rotation=0  
linespacing=0.25 --q
```

Se muestra un texto con el comando *d.text* que indique la región en donde se han tomado las imágenes, ubicándolo convenientemente en la última ventana abierta.

```
d.text -s 'text=Paramonga' size=12 color=0:0:0 at=5,86 align=ll rotation=0  
linespacing=0.25 -q
```

Se ejecuta el comando *d.zoom* que permite al usuario ajustar la región de trabajo actual de forma interactiva, es decir, haciendo uso del ratón.

```
d.zoom
```

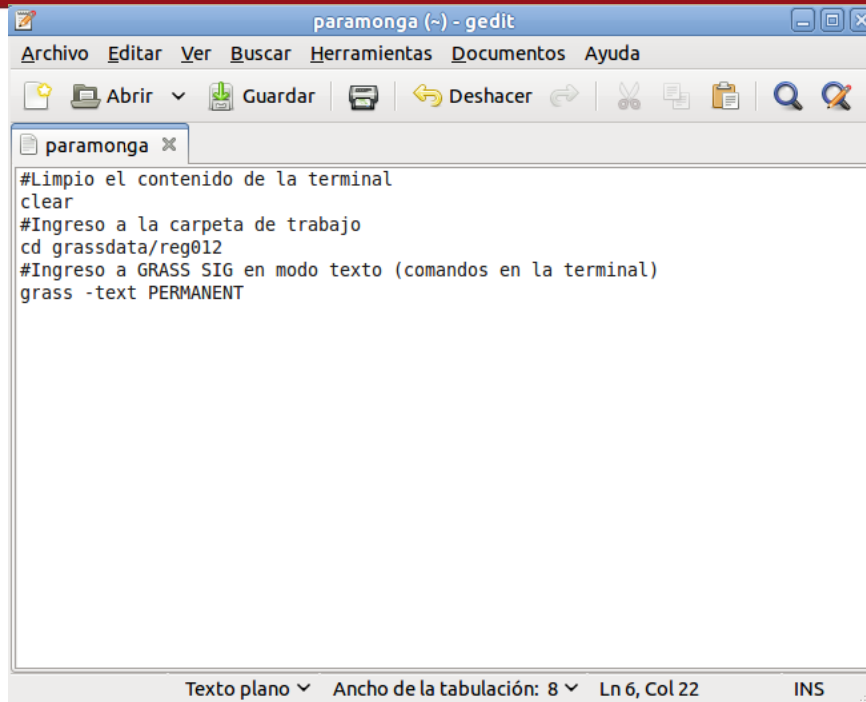
Se ejecuta el comando *d.what.rast* que permite al usuario consultar, de manera interactiva (con el ratón), el valor contenido en cada celda del mapa ráster; en este caso en particular, el valor NDVI. Además permite conocer la coordenada asociada a dicha celda.

```
d.what.rast
```

Para mayor información acerca del software GRASS y del modo de uso de sus comandos, consultar los anexos de esta tesis en el CD adjunto.

#### **4.5. Análisis de los resultados.**

Ante la necesidad de proveer de una interfaz en donde se puedan visualizar los resultados de la tesis, se crean un par de archivos de texto ejecutables o scripts. El primero de ellos (*paramonga.txt*) permite el ingreso al SIG GRASS e incluye la ruta en donde están almacenados los mapas ráster NDVI generados. El contenido del mismo se puede apreciar a continuación en la figura 4.4.

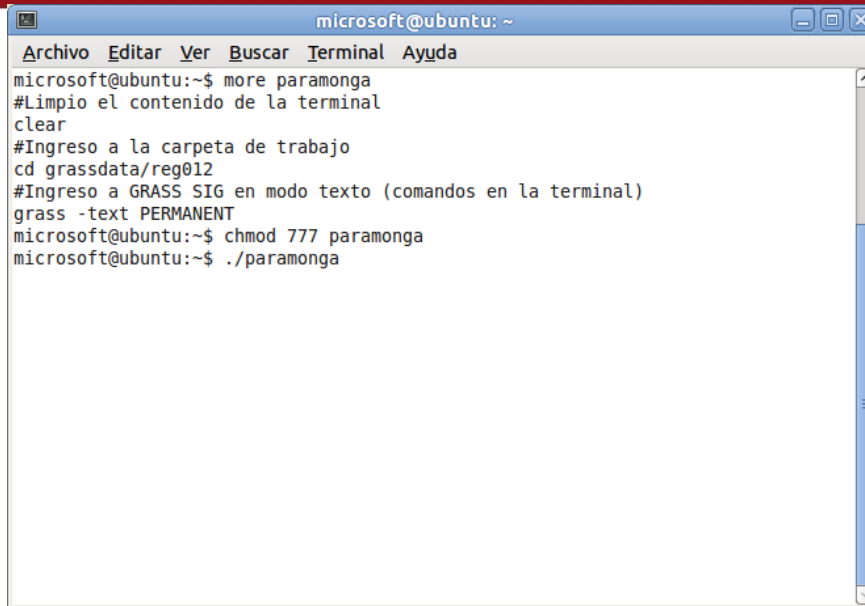


```
paramonga (~) - gedit
Archivo  Editar  Ver  Buscar  Herramientas  Documentos  Ayuda
Abrir  Guardar  Deshacer
paramonga x
#Limpio el contenido de la terminal
clear
#Ingreso a la carpeta de trabajo
cd grassdata/reg012
#Ingreso a GRASS SIG en modo texto (comandos en la terminal)
grass -text PERMANENT
Texto plano  Ancho de la tabulación: 8  Ln 6, Col 22  INS
```

**Figura 4.4:** Contenido del archivo paramonga.txt.

El segundo script (012.txt) contiene el código considerado en la etapa de visualización de imágenes en GRASS; y por tanto, se asume que el código de las etapas previas ya ha sido ejecutado.

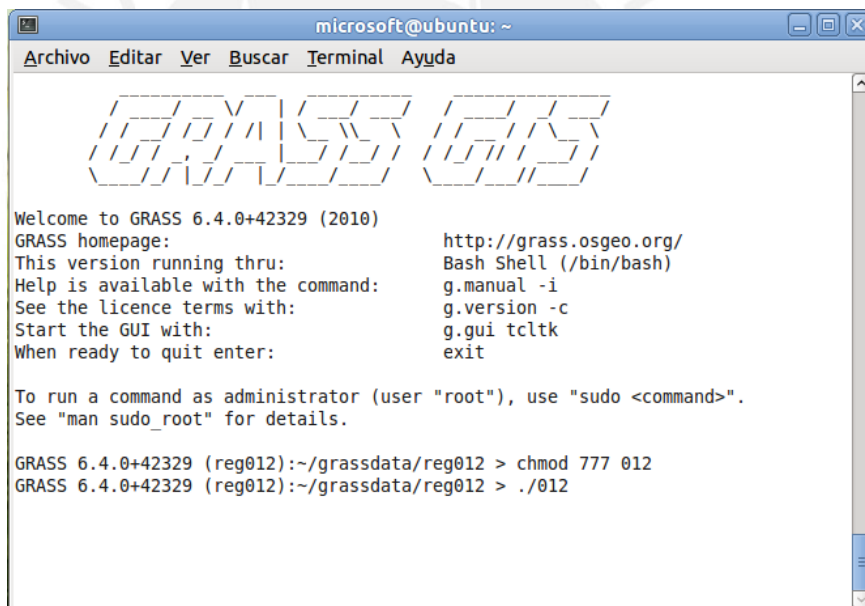
Se tiene que mencionar además que, para que este par de archivos de texto puedan ejecutarse, se hace uso de un comando propio de UNIX llamado *chmod 777*, el cual permite otorgar atributos de lectura, escritura y ejecución. Una vez hecho esto se tiene que ingresar a la terminal del sistema operativo, en donde se ejecutarán este par de scripts. A continuación, en la figura 4.5 y en la figura 4.6, se muestran los pasos a seguir para la visualización de los resultados obtenidos en GRASS.



```

microsoft@ubuntu: ~
Archivo Editar Ver Buscar Terminal Ayuda
microsoft@ubuntu:~$ more paramonga
#Limpio el contenido de la terminal
clear
#Ingreso a la carpeta de trabajo
cd grassdata/reg012
#Ingreso a GRASS SIG en modo texto (comandos en la terminal)
grass -text PERMANENT
microsoft@ubuntu:~$ chmod 777 paramonga
microsoft@ubuntu:~$ ./paramonga
  
```

**Figura 4.5:** Primer script ejecutado en la terminal.



```

microsoft@ubuntu: ~
Archivo Editar Ver Buscar Terminal Ayuda

  Welcome to GRASS 6.4.0+42329 (2010)
  GRASS homepage:                http://grass.osgeo.org/
  This version running thru:      Bash Shell (/bin/bash)
  Help is available with the command: g.manual -i
  See the licence terms with:     g.version -c
  Start the GUI with:             g.gui tcltk
  When ready to quit enter:       exit

  To run a command as administrator (user "root"), use "sudo <command>".
  See "man sudo_root" for details.

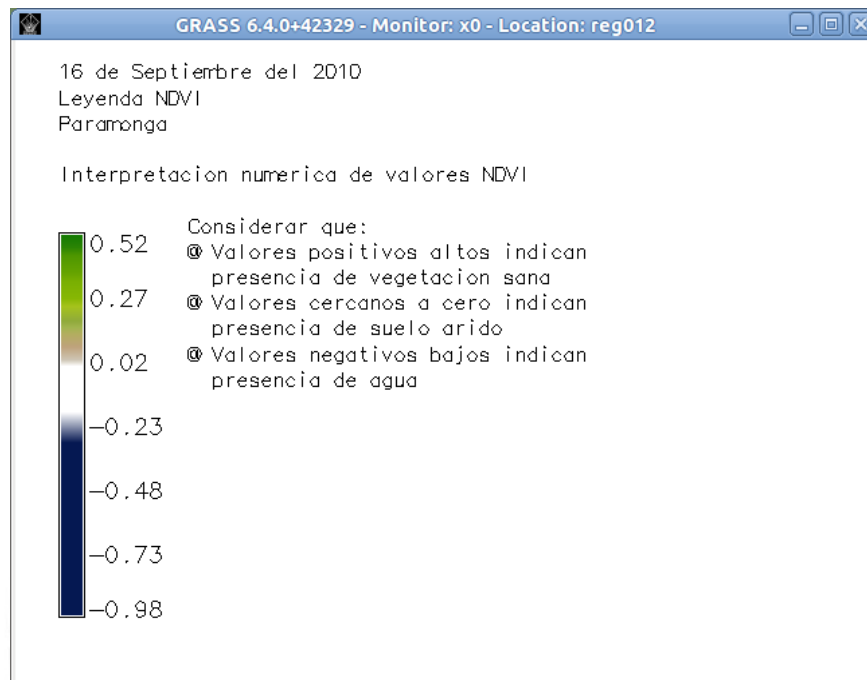
  GRASS 6.4.0+42329 (reg012):~/grassdata/reg012 > chmod 777 012
  GRASS 6.4.0+42329 (reg012):~/grassdata/reg012 > ./012
  
```

**Figura 4.6:** Segundo script ejecutado en la terminal.

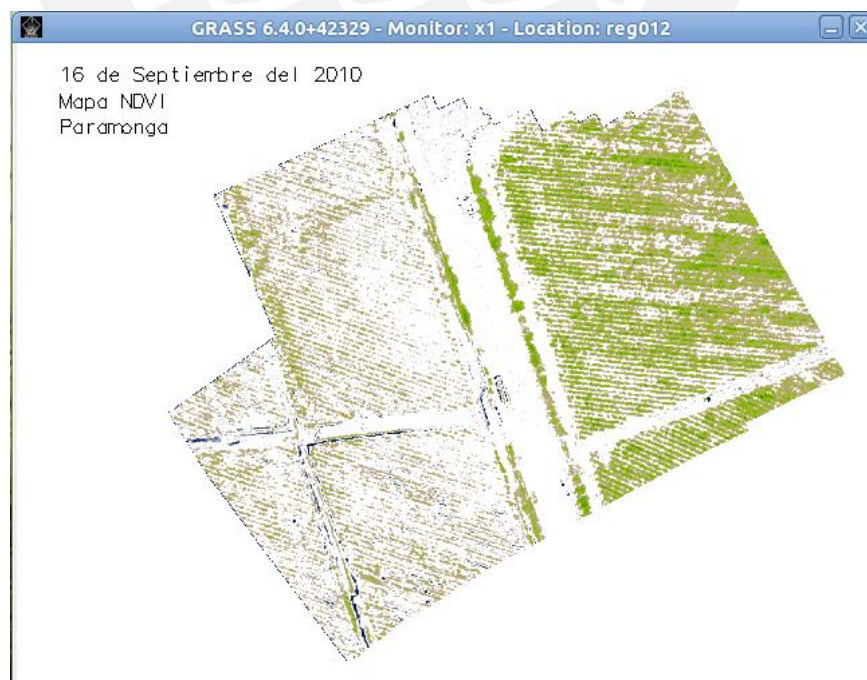
Tras haber ejecutado el segundo script se abren dos módulos, el primero de ellos, visto en la figura 4.7, muestra información textual que ayuda a la interpretación del mapa NDVI; el segundo, visto en la figura 4.8, muestra el mapa NDVI generado, trabajando en simultáneo con los datos presentados en la terminal, los cuales indican en un primer momento (ver figura 4.9) la posibilidad de realizar un ajuste de la región de trabajo. Una vez hecho dicho ajuste, se procede a obtener datos puntuales de la imagen; es decir, si se



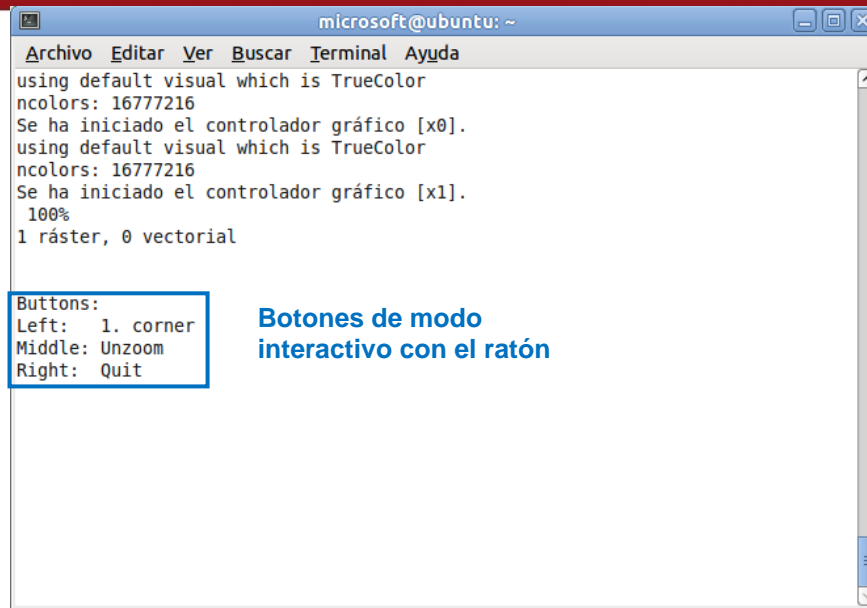
presiona el botón izquierdo del ratón cuando se está señalando algún punto de la imagen, se obtiene en la terminal su correspondiente valor NDVI y además la coordenada en latitud-longitud asociada a dicho punto, tal y como se observa en la figura 4.10.



**Figura 4.7:** Módulo de GRASS donde se muestran los datos NDVI.



**Figura 4.8:** Módulo de GRASS donde se muestra el mapa NDVI.



```

microsoft@ubuntu: ~
Archivo Editar Ver Buscar Terminal Ayuda
using default visual which is TrueColor
ncolors: 16777216
Se ha iniciado el controlador gráfico [x0].
using default visual which is TrueColor
ncolors: 16777216
Se ha iniciado el controlador gráfico [x1].
100%
1 ráster, 0 vectorial

Buttons:
Left: 1. corner
Middle: Unzoom
Right: Quit
  
```

**Botones de modo interactivo con el ratón**

**Figura 4.9:** Comando *d.zoom* ejecutado en la terminal.



```

microsoft@ubuntu: ~
Archivo Editar Ver Buscar Terminal Ayuda
Buttons
Left: what's here
Right: quit

77:39:55.393986W 10:38:50.151965S
012.ndvi@PERMANENT in PERMANENT, quant (0)
012.ndvi@PERMANENT in PERMANENT, actual (0.184783)

77:39:57.976946W 10:38:51.505602S
012.ndvi@PERMANENT in PERMANENT, quant (0)
012.ndvi@PERMANENT in PERMANENT, actual (0.108808)

77:39:56.070804W 10:38:51.243162S
012.ndvi@PERMANENT in PERMANENT, quant (0)
012.ndvi@PERMANENT in PERMANENT, actual (0.150442)

77:39:56.195118W 10:38:51.906168S
012.ndvi@PERMANENT in PERMANENT, quant (0)
012.ndvi@PERMANENT in PERMANENT, actual (-0.089947)

Buttons
Left: what's here
Right: quit
  
```

**Coordenadas geográficas (longitud, latitud)**

**Valores NDVI**

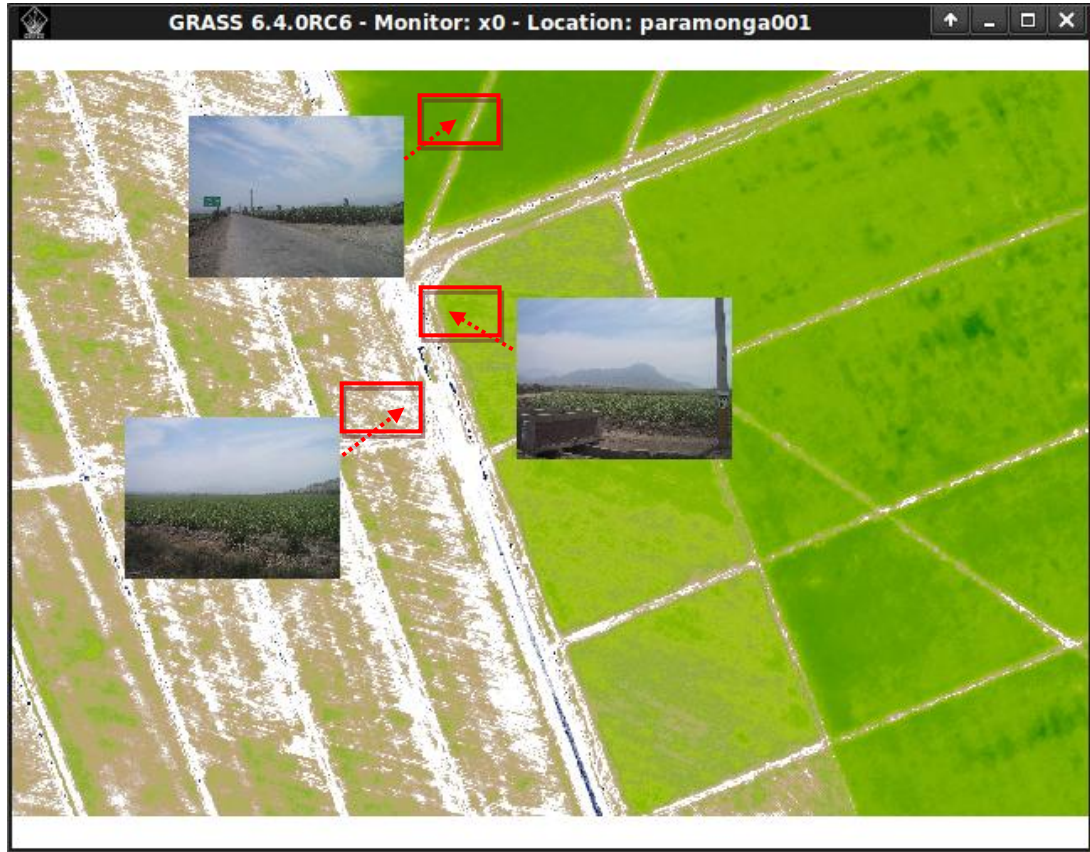
**Botones de modo interactivo con el ratón**

**Figura 4.10:** Comando *d.what.rast* ejecutado en la terminal.

Adicionalmente, se ha obtenido el mapa NDVI, considerando una porción de la imagen satelital de Paramonga, que corresponda a la región de trabajo presentada en los módulos de GRASS antes vistos.

Tal y como se puede observar en la figura 4.11, este mapa logra captar una mayor diferencia entre los cultivos de distintas edades, así como también con las áreas no cultivadas. Se debe tener en consideración el tiempo transcurrido entre la adquisición de las imágenes por sensado remoto y las

imágenes satelitales (casi un mes y medio), por lo cual se tiene una mayor presencia de cultivos “adultos” lo que se traduce en una mayor presencia de zonas con coloración verdosa.



**Figura 4.11:** Mapa NDVI de Paramonga obtenido de la imagen satelital.

MCMXVII

## CONCLUSIONES

1. El software SIG GRASS permite procesar las imágenes adquiridas tanto del sensado remoto como las imágenes adquiridas desde un satélite. Lo que lo convierte en un software lo suficientemente potente para cumplir con los requerimientos de la tesis; es decir, la manipulación de imágenes multiespectrales, el cálculo en base a estas de un índice vegetativo llamado NDVI y su posterior visualización.
2. El método por el cual se crea una imagen GeoTIFF que integra la información de las imágenes multiespectrales adquiridas con sus respectivos datos GPS, permite ingresar ambos datos al sistema de información para su posterior manipulación.
3. El factor NDVI permite diferenciar entre la vegetación sana y otros elementos presentes en las imágenes adquiridas, tales como suelo árido o incluso la presencia de zonas cubiertas de agua.
4. A través de los comandos y los módulos de GRASS se obtiene la información de interés; es decir, los valores NDVI y las coordenadas geográficas asociadas a las imágenes analizadas en dicho sistema de manera visual.

## RECOMENDACIONES

1. El hacer uso de un equipo receptor GPS, que en este caso particular presenta un error de hasta 3m, resta precisión geográfica a los resultados obtenidos. Por lo cual, el uso de un GPS con menor error es fundamental, o en caso contrario valerse de mapas catastrales, que no son otra cosa que mapas de referencia cuya elaboración, hoy en día, implica el uso de GPS con errores que están en el orden de los milímetros.
2. Realizar una Georrectificación que pueda considerar otras posibles fuentes de error; es decir, poder evaluar si la imagen además de ser rotada, necesita ser trasladada o incluso escalada, es otro factor fundamental para garantizar una georreferenciación precisa.
3. Capturar y procesar imágenes de una misma región en fechas diferentes, generando con ellas mapas NDVI, permitirá evaluar con mayor precisión la evolución de los cultivos.



## FUENTES

- [1] SMC. “Monitoreo de cultivos”, 2010 [consultado 12/04/2010]  
<http://www.monitoreodecultivos.com/>
- [2] FAO. “Buenas Prácticas Agrícolas”, 2008 [consultado 10/11/2010]  
[http://www.fao.org/prods/gap/index\\_es.htm](http://www.fao.org/prods/gap/index_es.htm)
- [3] Country Home. “Certificaciones”, 2010 [consultado 10/11/2010]  
<http://www.countryhomeperu.com/>
- [4] Agroindustrias AIB. Certificaciones, 2010 [consultado 10/11/2010]  
<http://www.aib.com.pe/certificaciones.html>
- [5] Agrícola Chapi. “Certificaciones”, 2006 [consultado 10/11/2010]  
[http://www.fao.org/prods/gap/index\\_es.htm](http://www.fao.org/prods/gap/index_es.htm)
- [6] GLOBALG.A.P. “Norma GLOBALG.A.P”, 2010  
[consultado 10/11/2010]  
<http://www.globalgap.org>
- [7] MC&M S.A. “Certificaciones”, 2010 [consultado 10/11/2010]  
<http://www.mcmperu.com/>
- [8] Danper. “Fundos propios certificados en USGAP y GLOBALGAP”,  
2010 [consultado 10/11/2010]  
<http://www.danper.com/Web/es/paginas/CadenaProductivaFundosPropios.aspx>
- [9] Green Perú. “Certificaciones de calidad”, 2010  
[consultado 10/11/2010]  
<http://www.greenperu.com/>



- [10] USDA. “Grading, Certification and Verification”, 2010  
[consultado 10/11/2010]  
<http://www.ams.usda.gov/AMSV1.0/ams.fetchTemplateData.do?template=TemplateN&page=GAPGHPAuditVerificationProgram>
- [11] AGRONET. “La Agricultura de Precisión una oportunidad para la competitividad y la sostenibilidad de los sistemas productivos”, 2010  
[consultado 10/11/2010]  
[http://www.agronet.gov.co/www/docs\\_agronet/2006419142629\\_Agriculturadepresici%C3%B3n.pdf](http://www.agronet.gov.co/www/docs_agronet/2006419142629_Agriculturadepresici%C3%B3n.pdf)
- [12] ESRI. “GIS for Agriculture”, 2009 [consultado 12/04/2010]  
<http://www.esri.com/library/bestpractices/gis-for-agriculture.pdf>
- [13] ESRI. “GIS Solutions for Agriculture”, 2007 [consultado 12/04/2010]  
<http://www.esri.com/library/brochures/pdfs/gis-sols-for-agriculture.pdf>
- [14] Neteler, Markus y Mitsova, Helena. “Open Source GIS: a GRASS GIS Approach”. 2a ed. New York: Springer Science+Business Media, 2004.
- [15] GRASS GIS. “Introducción”, 2010 [consultado 12/04/2010]  
<http://www.um.es/geograf/sigmur/yerba/intro.html>
- [16] Iturrate, Eduardo. “Curso Básico de Teledetección con ENVI”, 1998  
[consultado 10/11/2010]  
<http://www.innovanet.com.ar/gis/TELEDETE/TELEDETE/teledete.htm>
- [17] Conesa García, Carmelo. “El empleo de los SIG y la Teledetección en Planificación Territorial”. 1a ed. España: Universidad de Murcia, 2004.
- [18] GISdevelopment. “GeoTIFF, A standard image file format for GIS applications” [consultado 10/11/2010]  
<http://www.gisdevelopment.net/technology/ip/mi03117pf.htm>

- [19] Dawson, Martin, Winterbottom, James y Thomson, Martin. "IP Location, Geographic Location Measurement, Delivery & Conveyance". 1a ed. United States of America: McGraw-Hill Professional, 2007.
- [20] USGS. "What is NDVI", 2010 [consultado 10/11/2010]  
<http://ivm.cr.usgs.gov/whatndvi.php>
- [21] Olympian Engineering. "GeoTIFF Creation", 2007  
[consultado 10/11/2010]  
<http://www.samueltoepke.com/projects/olympianengine/public/tutorials/geotiff/index.html>
- [22] NASA Earth Observatory. "Blue Marble next generation", 2010  
[consultado 10/11/2010]  
<http://earthobservatory.nasa.gov/Features/BlueMarble/>
- [23] Listgeo. "Dump GeoTIFF Metadata" [consultado 10/11/2010]  
<http://www.remotesensing.org/geotiff/listgeo.html>
- [24] Geotifcp. "Copy TIFF with updated GeoTIFF Metadata"  
[consultado 10/11/2010]  
<http://www.remotesensing.org/geotiff/geotifcp.html>
- [25] GRASS Development Team. "Requirements to compile GRASS 6", 2006 [consultado 15/11/2010]  
<http://grass.fbk.eu/grass63/source/REQUIREMENTS.html>
- [26] Agro Industrial Paramonga. "Empresa", 2008 [consultado 15/11/2010]  
[http://www.agroparamonga.com/.](http://www.agroparamonga.com/)