



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL LITORAL
FACULTAD DE INGENIERIA Y CIENCIAS HIDRICAS

Ingeniería Informática

Informe Final

Software para realizar agricultura de precisión aplicando procesamiento de imágenes captadas por dron

6 de octubre de 2018

Autor:

Castello Facundo

Director:

Martinez Cesar

Co-Director:

Albornoz Enrique

sinc(r) Research Institute for Signals, Systems and Computational Intelligence (sinc.unl.edu.ar)
F. Castiello, C. E. Martínez & E. M. Albornoz, "Software para realizar agricultura de precisión aplicando procesamiento por imágenes captadas por dron (Undergraduate project)"
Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas - Universidad Nacional del Litoral, 2018.

Dedicatoria

A mis familiares

A mis padres Adrian y Alejandra por ser el pilar fundamental en todo lo que soy, en toda mi educación, tanto académica, como de la vida, por su incondicional apoyo perfectamente mantenido a través del tiempo. A mi hermano, mi tío y mis primos por estar conmigo en los momentos que los necesité. A mi novia Guadalupe por su contención, ayuda y presencia.

A mis amigos

Que nos apoyamos mutuamente en nuestra formación profesional por ayudarme a crecer tanto en lo académico como en lo personal.

A mis maestros

Que marcaron cada etapa de nuestro camino universitario, y a mis directores que me ayudaron en asesorías y dudas presentadas en la elaboración de la tesis.

sinc(r) Research Institute for Signals, Systems and Computational Intelligence (sinc.unl.edu.ar)
F. Castiello, C. E. Martínez & E. M. Albornoz, "Software para realizar agricultura de precisión aplicando procesamiento por imágenes captadas por dron (Undergraduate project)"
Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas - Universidad Nacional del Litoral, 2018.

Índice general

Índice de figuras	8
1. Introducción	12
1.1. Justificación	12
1.2. Objetivos	14
1.2.1. Objetivo general	14
1.2.2. Objetivos específicos	14
1.3. Alcance	14
2. Herramientas y vuelos	16
2.1. Dron	16
2.2. Cámara	18
2.3. Pruebas realizadas	20
2.3.1. Familiarización con indicador LED	20
2.3.2. Despegue y aterrizaje	21
2.3.3. Movilidad en el aire	21
2.3.4. Pruebas fotográficas	21
2.3.5. Pruebas de duración de batería	21
2.3.6. Familiarización con el software Ground Station	22
2.3.7. Realización de misiones	22
2.4. Guías de uso del dron	22
2.4.1. Guía para realizar un vuelo	23
2.4.2. Guía para configurar el autopiloto	24
2.4.3. Guía para configurar el Gimbal	27
3. Generación de orto-mosaicos	29
3.1. Transformaciones	29
3.1.1. Transformaciones en 2D	29
3.1.2. Distorsión en la lente	31
3.2. Puntos claves	32
3.2.1. Detección de puntos claves	33
3.2.1.1. Formulación Matemática	34
3.2.1.2. Espacio escalar	37
3.2.1.3. AKAZE	37
3.2.2. Descripción de puntos claves	40
3.2.2.1. Diferencia Local Binaria	41

3.2.2.2.	Diferencia Local Binaria Modificado	42
3.2.3.	Emparejar puntos claves	43
3.2.3.1.	Métodos de emparejamiento	43
3.2.3.2.	Remover pares falsos	44
3.2.4.	Aproximar transformaciones	44
3.3.	Proceso	45
3.3.1.	Carga y pre-procesamiento de imágenes	45
3.3.1.1.	Calibrar la cámara	45
3.3.1.2.	Remover efecto viñeta	45
3.3.1.3.	Redimensionar las imágenes	46
3.3.2.	Detección y descripción de los puntos claves de cada imagen	46
3.3.3.	Emparejamiento de los puntos claves de una imagen con la consecutiva	47
3.3.4.	Eliminar los pares falsos	47
3.3.5.	Calcular la transformación	49
3.3.6.	Evaluar pegado	51
3.3.7.	Generar el cuadro delimitador	51
3.3.8.	Adaptar transformaciones	52
3.3.9.	Realizar el pegado	53
3.4.	Experimentos y discusiones	53
3.4.1.	Discusión acerca de malas transformaciones	53
3.4.2.	Discusión acerca de punto de fuga	54
3.4.3.	Discusión acerca del problema costura	56
3.4.4.	Discusión acerca del error acumulado	57
3.4.5.	Discusión acerca de la captura de las imágenes	57
3.4.6.	Discusión acerca del tiempo de procesamiento	58
4.	Cálculo de índices de vegetación	59
4.1.	Información útil para calcular índices	59
4.2.	Extracción de metadatos	61
4.3.	Comportamiento espectral de la hoja viva	62
4.4.	Índices de vegetación	65
4.4.1.	NDVI	65
4.4.2.	RVI	66
4.4.3.	NGRDI	66
4.4.4.	RG	66
4.5.	Experimentos	66
4.5.1.	NDVI	67
4.5.2.	RVI	68
4.5.3.	RG	68
4.5.4.	NGRDI	68
4.6.	Discusión	69
4.7.	Reportes de desempeño	69
4.7.1.	Enfoque local	69
4.7.1.1.	Segmentación y cuantificación del color	70
4.7.1.2.	Mapas de colores	71
4.7.2.	Enfoque global	71

4.7.2.1. Cuantificación global	72
5. Redacción de informes	74
5.1. Estructura del informe	75
5.1.1. Estructura portada	75
5.1.2. Plantilla de página	76
5.1.3. Estructura de las secciones del cuerpo del informe	77
5.2. Contenido del cuerpo del informe	78
5.2.1. Orto-mosaico y metadatos	78
5.2.2. Índice de vegetación	79
5.2.3. Cuantificación del color	79
5.2.4. Mapa de colores	79
5.2.5. Cuantificación global	80
6. Desarrollo y uso del software	82
6.1. Elicitación de requerimientos	82
6.1.1. Requerimientos funcionales	82
6.1.2. Requerimientos no funcionales	85
6.2. Arquitectura del software	86
6.3. Uso del software	90
6.3.1. Obtener coeficientes de distorsión	91
6.3.2. Remover distorsión de imágenes	92
6.3.3. Pegar imágenes	92
6.3.4. Calcular información útil	93
6.3.5. Obtener índices de vegetación	95
6.3.6. Obtener reportes de desempeño	95
6.3.7. Redactar informes	96
7. Conclusiones y Trabajos Futuros	97
Referencias	100
Anexo	103

sinc(r) Research Institute for Signals, Systems and Computational Intelligence (sinc.unl.edu.ar)
F. Castiello, C. E. Martínez & E. M. Albornoz, "Software para realizar agricultura de precisión aplicando procesamiento por imágenes captadas por dron (Undergraduate project)"
Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas - Universidad Nacional del Litoral, 2018.

Índice de figuras

2.1.	Combo DJI F550	17
2.2.	Controladora de vuelo Naza-M V2	17
2.3.	Radio Control DevoF12E	17
2.4.	Batería	18
2.5.	Cargador universal	18
2.6.	2.4 GHz Bluetooth DataLink DJI	18
2.7.	Funcionamiento Gimbal.	19
2.8.	Camera Mapir Survey 2.	20
2.9.	Fotos con la cámara Survey2 posicionada en el gimbal.	21
2.10.	Indicador led.	23
2.11.	Indicador led.	23
2.12.	Orientación del dron	24
2.13.	Editor dentro del groundstation.	26
2.14.	Servo action.	28
2.15.	F channel.	28
3.1.	Transformaciones más simples en 2D. Adaptada de [9].	30
3.2.	a - Imagen sin distorsión b - Distorsión radial positiva c - Distorsión radial negativa. Adaptada de [10].	32
3.3.	Puntos claves de un objeto en 2 imágenes diferentes, obtenida de [11].	33
3.4.	Trigo.	34
3.5.	Problema de apertura.	34
3.6.	Fila superior: zonas que son posibles puntos claves. Fila del medio: autovalores de la matriz de Harris y la medida de calidad C con $\alpha = 0.04$. Fila de abajo: Suma de diferencias cuadradas $E(u, v)$, obtenida de [12].	36
3.7.	Difuminado con Diferencia de Gaussianos (arriba), Difuminado con filtro de difusión no lineal (abajo), obtenida de [13].	38
3.8.	Ejemplo de marco de trabajo piramidal con espacio escalar gaussiano. Adaptada de [12].	40
3.9.	Estimando la orientación dominante de un punto clave. (a) Punto clave detectado. (b) Direcciones de los gradientes para los puntos que se encuentren en la vecindad del punto clave. (c) Histograma de gradientes con un máximo cerca de $\pi/3$ radianes. (d) La orientación estimada del punto clave, indicada por la línea dentro del círculo, obtenida de [12].	41
3.10.	Ilustración de evaluaciones binarias en los pares diagonales de tres ventanas de una imagen, obtenida de [15].	42

3.11. imágenes con y sin distorsión de ojo de pez.	45
3.12. imágenes con y sin efecto viñeta.	46
3.13. Pares falsos.	47
3.14. Pares de puntos claves sin aplicar primer criterio (arriba), pares de puntos aplicándolo (abajo).	48
3.15. Pares de puntos claves sin aplicar segundo criterio (arriba), pares de puntos aplicándolo (abajo).	49
3.16. Orto-mosaico con diferentes transformaciones.	50
3.17. Sistema de coordenadas en procesamiento digital de imágenes.	52
3.18. Cuadro delimitador del pegado de 2 imágenes.	52
3.19. Mascara cuyo valor disminuye cuando se aleja del centro de la imagen.	54
3.20. Deformaciones que se apreciaban en algunos pegados.	55
3.21. Efecto de punto de fuga en orto-mosaicos.	56
3.22. Problema de costura.	57
4.1. Espectros correspondientes al rojo e infrarrojo. Adaptada de [18]	60
4.2. Respuesta espectral del sensor CCD. Adaptada de [19]	60
4.3. Separación y corrección de canales de un orto-mosaico.	61
4.4. Orto-mosaico con líneas verticales y horizontales equidistantes cuya distancia representa 50 metros.	62
4.5. Sección transversal de la hoja típica. Adaptada de [20].	63
4.6. Reflectancia de las plantas. Adaptada de [21].	64
4.7. Comportamiento de los espectros dependiendo del estado de la hoja. Adaptada de [22].	65
4.8. Orto-mosaicos de los cultivos.	67
4.9. Orto-mosaico generado con imágenes RGB obtenidas del cultivo soja.	67
4.10. Separación y corrección de canales de un orto-mosaico.	68
4.11. Índices con cuantificación de colores.	70
4.12. Tabla de búsqueda.	71
4.13. Índices con mapa de colores.	71
4.14. Índices con cuantificación global.	73
5.1. Ejemplo de portada.	76
5.2. Ejemplo de encabezado de página.	76
5.3. Ejemplo de pie de página.	77
5.4. Estructura de las secciones del cuerpo del informe.	77
5.5. Ejemplo de sección de Orto-mosaico.	78
5.6. Ejemplo de sección de Índice de vegetación.	79
5.7. Ejemplo de sección Cuantificación del color.	80
5.8. Ejemplo de Mapa de colores.	80
5.9. Ejemplo de sección Cuantificación global.	81
6.1. Ilustración de los requerimientos funcionales.	83
6.2. Arquitectura de los sistemas de procesamiento por lotes. Adaptada de [23].	87
6.3. Arquitectura del software.	87
6.4. Entrada, proceso y salida del subsistema <i>Obtención de coeficientes de distorsión</i>	87

6.5. Entrada, proceso y salida del subsistema *Remoción de distorsión de imágenes*. 88

6.6. Entrada, proceso y salida del subsistema *Pegado de imágenes*. 88

6.7. Entrada, proceso y salida del subsistema *Obtención de información útil*. . . 89

6.8. Entrada, proceso y salida del subsistema *Cálculo de índices de vegetación*. . 89

6.9. Entrada, proceso y salida del subsistema *Generación de reportes de desempeño*. 90

6.10. Entrada, proceso y salida del subsistema *Redacción de informes*. 90

6.11. Lista de acciones que puede realizar el software. 90

6.12. Conjunto de imágenes de un tablero de ajedrez. 91

6.13. Interacción del sistema con el usuario para cargar los datos necesarios para obtener los coeficientes de distorsión 91

6.14. Detalles del estado de la obtención de los coeficientes de distorsión 91

6.15. Interacción del sistema con el usuario para cargar los datos necesarios para remover la distorsión de las imágenes 92

6.16. Detalles del estado de la remoción de la distorsión 92

6.17. Interacción del sistema con el usuario para cargar los datos necesarios para pegar las imágenes 93

6.18. Detalles del procesado de 71 imágenes 93

6.19. Detalles del pegado de una fila de 22 imágenes 93

6.20. Detalles de la generación del resultado final 94

6.21. Interacción del sistema con el usuario para cargar los datos necesarios para calcular la información útil 94

6.22. Detalles del cálculo de la información de las imágenes 94

6.23. Interacción del sistema con el usuario para cargar los datos necesarios para la obtención de índices de vegetación 95

6.24. Detalles de la obtención de índices de vegetación 95

6.25. Interacción del sistema con el usuario para cargar los datos necesarios para la obtención de los reportes de desempeño 95

6.26. Detalles de la obtención de reportes de desempeño 96

6.27. Detalles de la redacción de informes 96

sinc(r) Research Institute for Signals, Systems and Computational Intelligence (sinc.unl.edu.ar)
F. Castiello, C. E. Martínez & E. M. Albornoz, "Software para realizar agricultura de precisión aplicando procesamiento por imágenes captadas por dron (Undergraduate project)"
Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas - Universidad Nacional del Litoral, 2018.

Capítulo 1

Introducción

El empleo de la teledetección, cada vez más extendido para el análisis y gestión de los recursos naturales, se encuentra condicionado por las limitaciones en cuanto a resolución espacial, espectral y temporal de las imágenes disponibles. La llegada al mundo civil de los vehículos aéreos no tripulados, conocidos por las siglas UAS (Unmanned Aerial System) o RPAS (Remotely Piloted Aircraft System), junto con los avances en el desarrollo de microsensores, posibilita un nuevo concepto de Teledetección de Alta Resolución donde se pueden superar ciertas limitaciones en los tres niveles de resolución (espacial, espectral y temporal), económicamente viables en superficies a escala monte [1].

Los vehículos aéreos no tripulados, se han desarrollado en los últimos años como una nueva plataforma versátil para la adquisición de imágenes remotas con multitud de aplicaciones en cartografía, termografía y agricultura de precisión.

Agricultura de precisión es un concepto agronómico, que consiste en el manejo diferenciado de los cultivos a partir del conocimiento de la variabilidad existente en una explotación agrícola. Según Blackmore y otros [2], la agricultura de precisión se define como el “manejo de la variabilidad espacial y temporal a nivel de subparcela de campo, para mejorar el retorno económico y reducir el impacto ambiental”. Para caracterizar esta variabilidad se utilizan imágenes multi-espectrales obtenidas a partir de satélites, aviones o UAS/RPAS. Los datos captados por todos estos sensores se almacenan digitalmente en forma de tablas y mapas, a partir de los cuales se genera la información que ayuda al agricultor en la toma de decisiones en campo. El objetivo último y más importante de la agricultura de precisión es la obtención de mayores rendimientos económicos y minimizar el daño al medio ambiente aumentando la competitividad a través de una mayor eficacia en las prácticas agrícolas [3].

1.1. Justificación

Una de las ramas económicas más importantes de la Argentina es la agricultura. No solo satisface la demanda interna sino que además sus productos se exportan al mundo. Desde la época de la colonia hasta el comienzo de este nuevo milenio, la agricultura en Argentina ha sufrido diversas transformaciones que le han permitido posicionarse como un modelo productivo global. Esto hace que sea de especial relevancia la gestión de parcelas agrícolas sobre la base de la observación, la medida y la actuación frente a la variabilidad del cultivo. A esto último se le llama agricultura de precisión y se presenta como una

excelente herramienta útil para maximizar rendimientos en los sitios donde sea económico hacerlo y minimizar los costos en áreas del lote con limitantes económicamente incorregibles, pero por sobre todas las cosas viene a vincular al productor con el concepto de sustentabilidad del medio ambiente. Concepto que durante décadas se dejó de lado y solo aparecía la rentabilidad por hectárea [4]. Se puede decir que el productor agropecuario se ve ampliamente beneficiado por la implementación de agricultura de precisión, ya que, al poder utilizar de forma más óptima los recursos, resultaría en mayores ganancias para este.

Como indicó el Ingeniero agrónomo Raúl Andrade "Actualmente el Ingeniero agrónomo se encarga de sacarle provecho al suelo, al clima y al hombre sin dañarlos. De esta manera genera alimentos que beneficiaran al desarrollo de la sociedad" [5]. Para gran parte de la realización de esto, se requiere de un arduo trabajo de campo con la finalidad de estar en condiciones de tomar una serie de decisiones que conlleven a un resultado óptimo. Este trabajo se encuentra limitado por las capacidades del ser humano en comparación con las de una máquina, ya que esta permite un procesamiento de datos a una velocidad que no tiene comparación con la del cerebro, además de que con la tecnología de hoy en día se pueden realizar acciones automatizadas que permiten que el personal pueda ocupar el tiempo en otras tareas de igual o mayor importancia. Por otro lado el trabajo que realiza el Ingeniero agrónomo, además de ser muy amplio, requiere de mucho conocimiento y experiencia, por lo que no se puede reemplazar por una "máquina", pero lo que sí se puede hacer es brindarle una serie de herramientas para optimizar y hacer más efectivas algunas de sus labores que debe llevar a cabo.

Utilizar las herramientas que la informática brinda para trabajos como este tienen un gran impacto en varios ámbitos. En el caso particular del que se trata en este documento se puede nombrar varios medios que se van a ver positivamente afectados, como el económico, ya que se podrá dar un uso mucho más efectivo de los recursos con los que se cuenta. Esto a la vez va a influir en el medio ambiente debido a que al tener mayor conocimiento sobre el estado actual de la zona observada se minimizaría el efecto negativo que tienen mucho de los productos que se usan en este rubro. Por ejemplo, utilizando procesamiento digital de imágenes, se puede saber qué zonas de una parcela tienen menor rendimiento y utilizar esta información para realizar una fertilización variable, minimizando la huella dejada en la tierra (impacto en el medio ambiente) y reduciendo los costos que realizar esto en toda una parcela conllevaría (impacto en la economía) [6]. Otra ventaja que es importante mencionar es que se minimizaría el trabajo de campo que el Ingeniero agrónomo tiene que realizar, brindándole muchos de los datos que este requiere y permitiendo que concentre su tiempo en una realización óptima de otras tareas.

Con la realización de este proyecto se busca la obtención y análisis de datos útiles acerca de cada etapa de un determinado proceso de cultivo que se esté llevando a cabo en una parcela.

La obtención de los datos antes nombrados será mediante la utilización de un dron (vehículo aéreo no tripulado) y por medio del siguiente procedimiento. Utilizando el vehículo aéreo, se obtendrán imágenes de una parcela de la que se quiera adquirir información sobre su estado. Luego, con estas imágenes se realizara un mosaico panorámico de toda la estructura a analizar, sobre el cual se emplearan herramientas de procesamiento digital de imágenes para examinarlo y extraer automáticamente una serie de datos correspondientes al estado de los suelos y el cultivo.

Actualmente se encuentran disponibles investigaciones que tratan temas relacionados con lo que se va a realizar. Por ejemplo hay artículos que informan algunas experiencias relacionadas con el análisis de cultivos implementando agricultura de precisión por medio de imágenes capturadas por dron [7]. Además existen empresas que prestan el servicio de vigilancia de cultivos mediante imágenes satelitales, las cuales se obtienen cada 16 días, lo cual no permite tener una evaluación aceptable sobre el estado actual de la zona a observar. También hay empresas que prestan el servicio de vigilancia de cultivos mediante drones, incluso algunas venden el equipo que realiza esa función, pero, además de su elevado precio, estos son sistemas comerciales cerrados por lo cual no se pueden agregar funcionalidades, ni adaptarlas al caso de estudio.

En resumen, para suplir las limitaciones que el Ingeniero agrónomo tiene por su condición de humano, es conveniente aprovechar los beneficios que ofrece la tecnología para implementar la agricultura de precisión como herramienta agrícola.

Por un lado, la utilización de un dron brinda la ventaja de ofrecer imágenes aéreas cubriendo grandes superficies por su capacidad de volar. Por otro lado, el uso de una computadora para realizar análisis profundos en un tiempo relativamente corto, gracias a la velocidad de procesamiento que esta posee. Estos instrumentos permiten la gestión de parcelas agrícolas sobre la base de la observación y la medida frente a la variabilidad del cultivo.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Desarrollar un sistema de captura y análisis de imágenes aéreas para la evaluación automática de parcelas en agricultura de precisión.

1.2.2. Objetivos específicos

- Diseñar la experimentación en campo con dron para obtención de imágenes, realizar pruebas, ajustes y correcciones al método de captura de imágenes.
- Diseñar y desarrollar técnicas de procesamiento de imágenes para la generación de mosaicos panorámicos y extracción de información útil.
- Implementar métodos para cálculo de diferentes parámetros que informen sobre el estado del campo.
- Calcular índices objetivos sobre el estado del campo.
- Generar reportes de desempeño obtenido y redactar informes técnicos periódicos.

1.3. Alcance

En las limitaciones de este proyecto, es de importancia aclarar que el estudio a realizar será sobre las especies de plantas cuyo proceso de cultivo se esté llevando a cabo en la

parcela a observar. El motivo para esto es que el tiempo que se dispone solo permite realizar los experimentos necesarios en dos casos de estudio. Cabe aclarar que el sistema a desarrollar se encargará de brindar los datos que pueden bien ser utilizados o no para el proceso de toma de decisiones y resolución de problemas, pero su influencia depende directamente del personal que se ocupe de estos procesos, es decir, el software no indicara que se requiera tomar algún cambio de dirección en cuanto a los procedimientos que se estén llevando a cabo, solo se limitará a proporcionar datos que puedan ayudar a concluir dicho requerimiento.

Capítulo 2

Herramientas y vuelos

2.1. Dron

Para dar inicio a este proyecto se requirió estudiar información sobre el dron y así poder dar respuesta a la pregunta ¿qué dron se ajusta mejor a los requisitos del proyecto?, partiendo desde esta incógnita, se comenzó con las averiguaciones. Los requisitos que se tuvieron en cuenta fueron los siguientes:

- Se tiene que poder indicarle una ruta, y que este la recorra automáticamente.
- Se debe poder montarle una cámara multi-espectral o una cámara adaptada para que capture el rojo y el infrarrojo.
- Su alcance y distancia máxima le deben permitir realizar un amplio recorrido.

En un principio se consideró la opción de importar el dron, pero esto se descartó por la alta posibilidad de demoras por retención de aduana de más de 5 meses, por lo que se comenzó a averiguar dentro de Argentina. Por medio de búsquedas en internet y conversaciones con extranjeros expertos en manejo de dron, se llegó a la conclusión de que lo que se requería era un Do It Yourself (DIY) dron, ya que, estos permiten reemplazar las piezas que lo componen.

Una vez que se decidió por utilizar un DIY, se pasó a averiguar las partes necesarias para que el dron cumpla con los requisitos necesarios:

- Combo DJI F550 hexacoptero [Figura 2.1]:
 - Flame Wheel ARF kit. Se podría decir que es el “chasis”.
 - 6 X Electronic Speed Controller (ESC)
 - 6 X Motor
- Naza-M V2: Esto es la controladora de vuelo que sirve para [Figura 2.2]:
 - Controlar la velocidad de giro de cada motor para poder girar sobre su eje y moverse para cualquier dirección.
 - Permitir la funcionalidad de auto-piloto.



Figura 2.1: Combo DJI F550

- Sincronizar cada parte del dron (motores, radio control, DJI datalink y Gimbal).
- Hacer uso del GPS para los modos de vuelo que lo utilizan.
- Comunicar el estado de los componentes por medio del indicador LED.



Figura 2.2: Controladora de vuelo Naza-M V2

- Walkera DEVO F12E: Es el radio control que debe estar siempre en contacto con la controladora de vuelo, de lo contrario el dron vuelve automáticamente al punto donde comenzó la misión de vuelo [Figura 2.3].



Figura 2.3: Radio Control DevoF12E

- Batería Lipo 11.1v 5000mah: Esta batería brinda al dron una autonomía de entre 12 y 15 minutos, dependiendo de su uso [Figura 2.4].
- Cargador Imax B6 Ac para baterías Lipo [Figura 2.5].



Figura 2.4: Batería



Figura 2.5: Cargador universal

- 2.4 GHz Bluetooth DataLink DJI: Permite una conexión entre el dron y cualquier dispositivo que tenga Bluetooth y soporte el software para programar el autopiloto brindado por DJI (Ground Station) [Figura 2.6].



Figura 2.6: 2.4 GHz Bluetooth DataLink DJI

- DJI Zenmuse H3-2D: Permite al dron poder llevar la cámara que sera utilizada en este proyecto, y además cuenta con un estabilizador para que la misma siempre apunte a la misma dirección en cuanto a cabeceo y rotación (pitch y roll). [Figura 2.7].

2.2. Cámara

Por otro lado, para poder obtener las imágenes de las cuales se extraerán los datos para calcular los índices que dan información sobre el estado del campo, se hace uso de una cámara especial que registre con sus sensores el rojo y el infrarrojo cercano. Se realizaron

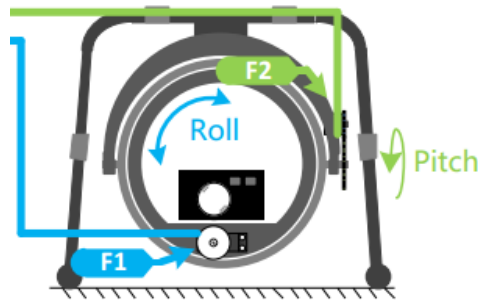


Figura 2.7: Funcionamiento Gimbal.

averiguaciones sobre muchos tipos y marcas de cámara que servían para este trabajo, pero en base a una relación precio-calidad, se procedió a seleccionar la siguiente:

Survey2 Camera – NDVI Red+NIR

Descripción: Esta cámara tiene un filtro de doble banda que refleja la luz roja en el canal rojo del sensor RGB y refleja la luz infrarroja cercana en el canal azul del sensor RGB. Lo que permite el uso de esta cámara especial, es el cálculo de un índice usado para estimar la cantidad, calidad y desarrollo de la vegetación [Figura 2.8].

Características relevantes:

Resolución del sensor en (megapíxeles)	16
Tamaño del sensor (mm)	6.17472 x 4.63104
Tamaño del píxel del sensor (um)	1.34
Longitud Focal del lente (mm)	3.97
Dimensión de la imagen (píxeles)	4608 x 3456
Velocidad de captura	RAW+JPG: 3 segundos/photo. JPG: 2 segundos/photo
Peso	64g
Ejemplo de distancia de campo	4.05 cm/px a 120m de altura

Estos datos son importantes para poder realizar la captura de las imágenes, ya que, son utilizados para calcular a que velocidad debe ir el dron, para una serie de variables deseadas. A continuación se propone un ejemplo:

- Altura de vuelo(m): 40
- Superposición Frontal (%): 70
- Intervalo de fotos (s): 3.497
- Velocidad (m/s): 4

La modificación de cualquiera de las variables, va a alterar al menos una de las otras. Por ejemplo, si se sacan las fotos desde una mayor altura, para que se mantenga la superposición deseada y el intervalo de fotos, se debe aumentar la velocidad a la que se mueve el dron.



Figura 2.8: Camera Mapir Survey 2.

2.3. Pruebas realizadas

Una vez que se contó con todas las herramientas necesarias, se procedió a realizar pruebas de vuelo en las que se busco desarrollar las siguientes capacidades:

- Familiarización con indicador LED.
- Despegue y aterrizaje.
- Movilidad en el aire.
- Pruebas fotográficas.
- Pruebas de duración de batería.
- Familiarización con el software Ground Station.
- Realización de misiones.

Se procede a detallar estos items.

2.3.1. Familiarización con indicador LED

Antes de poner el dron en el aire, se considero importante comprender el significado de cada combinación de luces reproducidos por el indicador, ya que, esta es la forma que tiene la controladora de vuelo para comunicar el estado de cada componente. Entre la información que este brinda, se consideraron que las siguientes son las mas importantes:

- El sistema comenzó.
- Se esta acabando la batería.
- En que modalidad de vuelo se encuentra el dron.
- La cantidad de satélites que se encontraron.

2.3.2. Despegue y aterrizaje

Para salvaguardar el dron, se realizaron múltiples pruebas de despegue y aterrizaje ya que estas son dos de las situaciones más críticas en las que pueden suceder algún golpe que afecte el funcionamiento del mismo. En la elevación puede suceder que por desniveles o falta de potencia el dispositivo quede de lado golpeando las hélices con el suelo. Por otro lado al tomar tierra si se desciende a una alta velocidad se puede golpear fuertemente el artefacto.

2.3.3. Movilidad en el aire

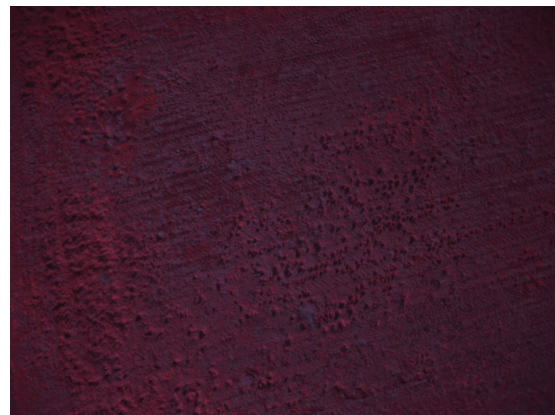
Otra situación de peligro es mientras el dron esta en el aire, cualquier mal movimiento puede finalizar en algún choque ya sea con algún árbol o con el suelo. Para lograr un buen manejo del dispositivo se busco algún lugar con la menor cantidad de objetos cercanos y se utilizó el modo de vuelo que menos riesgos tiene, el modo GPS. Este último permite que el dron se quede totalmente quieto (tanto vertical como horizontalmente) evitando que el viento u otras variables puedan producir algún inconveniente.

2.3.4. Pruebas fotográficas

Se realizaron vuelos, con la cámara incorporada al gimbal, en los cuales se obtuvieron fotos a medida que se iba a puntando a diferentes direcciones, para corroborar el funcionamiento del gimbal [Figura 2.9].



(a) Gimbal orientado al horizonte.



(b) Gimbal orientado paralelo al suelo.

Figura 2.9: Fotos con la cámara Survey2 posicionada en el gimbal.

2.3.5. Pruebas de duración de batería

Se realizaron vuelos variando el uso del dron (velocidad, tiempo sin moverse, etc), para obtener diferentes consumos de batería, y en base a esto calcular el tiempo que puede volar con una sola carga. Esto es necesario para posteriormente planificar las misiones automáticas, y así, no sobrepasar el tiempo de independencia del que se dispone.

2.3.6. Familiarización con el software Ground Station

El sistema Ground Station es el que se utiliza para programar las misiones de auto-piloto, este ofrece una serie de herramientas que permiten despegar el dron, realizar la misión, volver al punto desde donde se comenzó y aterrizar. Otra funcionalidad que ofrece es la de realizar una simulación de vuelo, la cual sirve para poder aprender a utilizar todas estas herramienta sin la necesidad de poner el dispositivo en el aire.

2.3.7. Realización de misiones

Una vez que se aprendió a utilizar correctamente el software se procedió a realizar recorridos sin el uso del simulador. Para esto se puso en práctica todo lo aprendido previamente, y se programaron recorridos en base a las características de la cámara, para obtener imágenes con un 70 % de superposición, ya que, es lo mínimo recomendado para obtener un resultado óptimo en etapas posteriores donde se tenga que realizar el ortomosaico.

2.4. Guías de uso del dron

En esta sección se plasmo todo lo que se necesito aprender para realizar los vuelos. Lo primero a saber es que la controladora de vuelo ofrece una serie de “modos” de vuelo los cuales pueden ser modificados con el switch que se encuentra en la parte superior derecha del control que se puede apreciar en la figura. Los modos con los que se cuenta, son los siguientes:

- GPS: El dron mantiene una altura y posición exacta en base al GPS, la única forma de que este se mueva es por medio del control, es decir, si alguien o algo trata de moverlo el artefacto va a hacer una fuerza opuesta para quedar en el mismo lugar.
- ATTI: El dron mantiene la misma altura y el rumbo que se le indique, es decir, su posición paralela a la tierra puede variar sin que el control este constantemente indicando la dirección a la que debe ir.
- Fail System: Hace que el dron pierda la señal del control, esto es útil en caso de perder de vista el artefacto, ya que con este modo el artefacto vuelve automáticamente al lugar donde fue encendido.

Otra funcionalidad que ofrece el control es la de modificar la posición del Gimbal por medio del "Gimbal Till" que comprende de dos switches donde uno lo hace rodar (roll) y el otro lo hace inclinarse (pitch) [Figura 2.7].

Por último, se procede a explicar la funcionalidad de los sticks de manejo:

- Stick izquierdo:
 - Movimiento vertical: Sirve para modificar la altura del dron. Cuando el stick se encuentra centrado el hexacoptero mantendrá su altura, mientras que si se mueve para abajo o para arriba, descenderá o ascenderá respectivamente.

- Movimiento horizontal: Se encarga de la rotación del dron sobre su propio eje.
- Stick derecho:
 - Movimiento Vertical: Indica al dron que se mueva para adelante o para atrás.
 - Movimiento Horizontal: Indica al dron que se mueva para la izquierda o para la derecha.

2.4.1. Guía para realizar un vuelo

Una vez comprendido todo esto, se procede a explicar paso a paso como realizar una misión de vuelo:

1. Elegir un lugar abierto sin obstrucciones, edificios, etc. Posicionar el dron a 3 metros de cualquier persona.
2. Inicialización y despegue:
 - a) Siempre prender primero el transmisor y luego el dron! Mantener quieto el hexacoptero hasta que finalice el auto chequeo indicado por la siguiente combinación del led ●●●●●●●●●● , luego de eso el led parpadeara 4 veces en color amarillo, indicando que el sistema está entrando en calor ●●●●.
 - b) Verificar que el transmisor esta correctamente conectado para esto:
 - 1) Poner el switch de modos del control en modo ATTI, y verificar que la luz LED parpadea 1 vez en color amarillo y luego 0, 1, 2 o 3 veces (dependiendo la cantidad de satélites que encuentre, >6,=6,=5 o <5 respectivamente).
 - 2) Poner el switch de modos del control en modo GPS, y verificar que la luz LED parpadea 1 vez en color amarillo y luego 0, 1, 2 o 3 veces.

Control Mode LED Indicator	GPS Signal Status LED Indicator
Manual Mode: NO LED	Signal is best (GPS satellites > 6) : NO LED
ATTI. Mode: ● (●● indicates that is stick(s) not at center)	Signal is well (GPS satellites = 6) : ●
GPS Mode: ● (●● indicates that is stick(s) not at center)	Signal is bad(GPS satellites = 5) : ●●
	Signal is worst (GPS satellites < 5) : ●●●

Figura 2.10: Indicador led.

- c) Mantener el dron quieto y realizar la combinación de comandos de los palillos (Combination Stick Commands (CSC)) mostrado en la siguiente imagen, para arrancar los motores [Figura 2.11].



Figura 2.11: Indicador led.

- d) Volver ambos sticks a la posición neutral (en el centro).
- e) Verificar que todos los motores están funcionando de forma correcta, para esto mueva el stick derecho para todas las direcciones, verificando que el dron realiza las aceleraciones individuales de cada motor en forma correcta.
- f) Una vez logrado todo lo anterior, se procede a realizar el despegue. Debido a que este dron no es liviano, se necesita dar mucha aceleración (levantando el stick de aceleración) inicialmente, y luego una vez supere el metro, llevar el stick al medio para que se mantenga “flotando” (hovering). Si el dron se esta elevando mucho, llevar el stick al neutro asi mantiene su altura.
- g) Prestar atención a los movimientos del dron, y usar el stick de la derecha para ajustar su posición. Tener en cuenta que los movimientos del dron van a depender a su orientación [Figura 2.12].

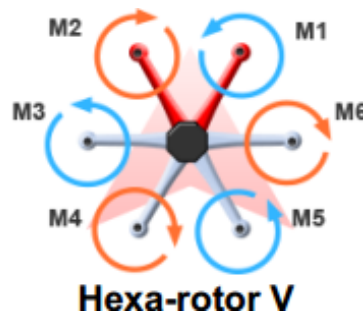




Figura 2.12: Orientación del dron

3. Una vez realizada la misión de vuelo, bajar el dron lentamente hasta que toque el suelo, y luego puede apagar los motores de 2 formas:
 - a) Bajar el stick de aceleración hasta que esté por debajo del 10
 - b) Ejecutar el CSC.
4. Apagar el dron y luego el radio control.

2.4.2. Guía para configurar el autopiloto

Uno de los motivos por las cuales se eligió esta estructura para el dron, es que los artefactos que lo componen permiten la utilización del autopiloto. Este es un sistema usado para controlar la trayectoria del dron sin tener que realizar un seguimiento constante del mismo. Consiste en asignar una serie de puntos de control que poseen ciertas características (latitud, longitud, altura, velocidad, etc.) los cuales serán recorridos por el vehículo. El beneficio de esto es poder realizar un recorrido automático y a una velocidad constante mientras que la cámara toma fotos a un intervalo de tiempo constante. A continuación se procede a desarrollar los pasos para llevar la configuración a cabo.

1. Abrir el software de DJI “GroundStation” desde la PC.
2. Conectar el DJI DataLink a la computadora por medio del cable USB.

- a) El led del mismo comenzará a titilar en color rojo (la luz tiene una etiqueta al lado que dice DATA/POWER).
3. Enchufar el dron a la batería.
 4. Prender el radio control.
 5. Poner el dron en modo GPS.
 6. Conectar el software al dron.
 - a) Click en connect (Arriba a la derecha).
 - b) Verificar que la barra del status de GPS pasó de  a .
 7. Verificar que el Altitude offset por defecto es HEIGHT:
 - a) Click en la pestaña Sys_set
 - b) Click en Altitude Offset.
 - c) Seleccionar HEIGHT.
 - d) Click en OK.
 8. Poner el controlador de vuelo en modo “Click and Go”:
 - a) Click en la pestaña ToolBox.
 - b) Seleccionar “Click Go Mode”.
 9. Seleccionar JOYSTICK:
 - a) Arriba a la izquierda en el software, cliquear JOYSTICK.
 - b) Cliquear SELECT JOYSTICK.
 10. Elegir el HOME POINT:
 - a) Arriba la derecha de la pantalla, cliquear SET HOME POSITION.
 11. Elegir los puntos de paso (WAYPOINTS):
 - a) Abrir el editor cliqueando el botón EDITOR arriba en el centro [Figura 2.13].
 - b) Click en NEW para crear una nueva ruta de vuelo.
 - c) Click en el botón “+“ y luego click en el mapa para agregar puntos de paso a la ruta.
 - d) Seleccionar la altura de cada punto.
 - 1) Si hay una línea roja entre dos puntos, es porque hay un problema de altura y se debe modificarla hasta que la línea se ponga azul.
 - e) Modificar los parámetros de vuelo cliqueando en la carpeta Editing Mission.
 - 1) Seleccionar el tiempo límite de vuelo a 600 (MissionTimeLmt).
 - 2) Cambiar ROUTE a StartToEnd.

- f) Click en SAVE.
- g) Click en UPLOAD.
- h) Va a mostrarse la misión de vuelo como una carta de texto.

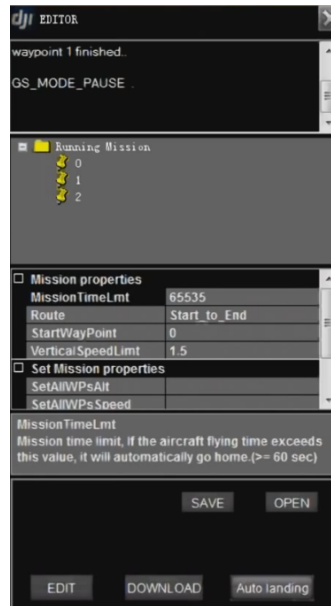


Figura 2.13: Editor dentro del groundstation.

12. Realizar el Auto Takeoff para que se realice el despegue y comience a flotar hasta quedar quieto sobre el HOME POINT:
 - a) Click en One key Takeoff que se encuentra arriba en el centro de la pantalla.
 - b) Poner el acelerador del transmisor en la posición central.
13. Una vez que este flotando, comenzar la ruta de vuelo:
 - a) Click en GO en el EDITOR.
 - b) El dron comenzará a moverse por los waypoints.
 - 1) Se puede ver el avance en el mapa que brinda el software.
 - 2) El software también permite que se vea el progreso en la parte de arriba de la pantalla EDITOR.
14. Una vez finalizado, clicar en GO HOME arriba a la derecha, para que el dron sobrevuele el HOME POINT.
15. Realizar el auto aterrizaje (AutoLanding):
 - a) Click en AutoLanding en el EDITOR.
 - b) Se le pedirá que cliquee PAUSE y luego se ponga en modo KEYBOARD.
 - c) En la parte superior derecha de la pantalla, clicar PAUSE.



- d) Click en KEYBOARD.
- e) Volver a clicar AutoLanding.

PARA FINALIZAR EL VUELO CON EL SOFTWARE Y SEGUIR CON EL RADIO CONTROL:

- 16. Cambiar el modo de GPS a ATT y luego nuevamente a GPS.
- 17. Ahora se puede controlar el dron por medio del radio control y no por el software.

2.4.3. Guía para configurar el Gimbal

El gimbal debe ser configurado para que las fotos se saquen de manera perpendicular a la superficie que se analice ya que de lo contrario no se podrá generar apropiadamente el orto-mosaico. Este dispositivo tiene un mecanismo de suspensión que permite mantener la orientación de la cámara aunque su soporte se mueva, por lo que solo se tiene que configurar su orientación. Esto se puede realizar de dos maneras, por medio del radio control y utilizando el software Ground Station. En este proyecto se va a desarrollar la segunda, ya que, permite mayor precisión. Los pasos para lograr esto son:

- 1. Abrir el software de DJI “GroundStation” desde la PC.
- 2. Conectar el DJI DataLink a la computadora por medio del cable USB.
- 3. Enchufar el dron a la batería.
- 4. Prender el radio control.
- 5. Poner el dron en modo GPS.
- 6. Conectar el software al dron.
 - a) Click en connect (Arriba a la derecha).
 - b) Verificar que la barra del status de GPS pasó de  a .
- 7. Verificar que Servo Action Mode este apagado [Figura 2.14]:
 - a) Click en la pestaña ToolBox.
 - b) Click en GP Servo Action Config.
 - c) Desactivar la opción Action Mode.
- 8. Acceder a F Channel Controller [Figura 2.15]:
 - a) Click en la pestaña ToolBox.
 - b) Click en F_ChannelController.
- 9. Modificar el Roll del Gimbal hasta que encuentre la posición deseada:

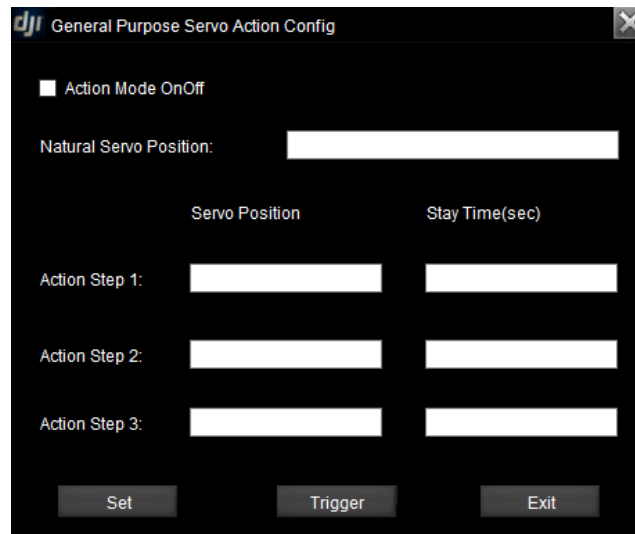


Figura 2.14: Servo action.

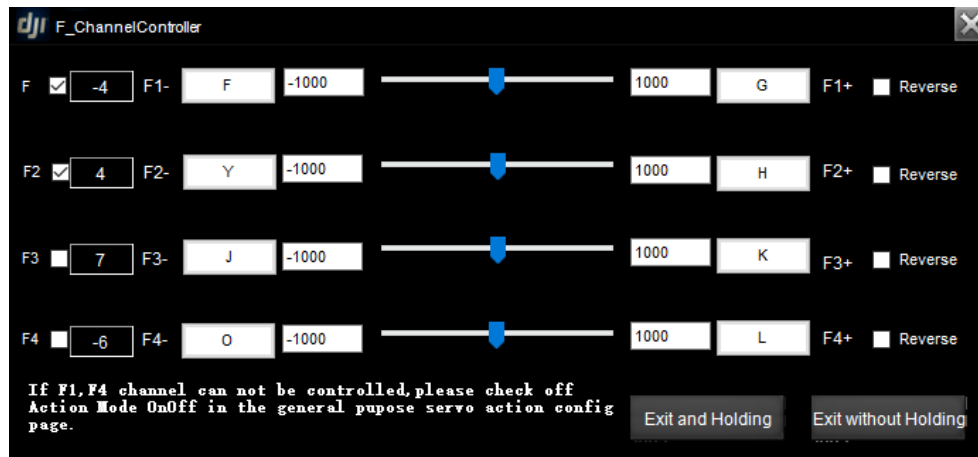


Figura 2.15: F channel.

- a) Activar el CheckBox F.
 - b) Modificarlo utilizando las teclas F y G.
10. Modificar el Pitch del Gimbal hasta que encuentre la posición deseada:
 - a) Activar el CheckBox F2.
 - b) Modificarlo utilizando las teclas Y y H.
 11. Anotar los números asignados a dicha configuración, ya que, cada vez que se reinicie el software, estos datos se pierden.

Capítulo 3

Generación de orto-mosaicos

La orto-fotografía es una presentación fotográfica de una zona de la superficie terrestre en la que todos los elementos presentan la misma escala, libre de errores y deformaciones, con la misma validez de un plano cartográfico [8]. Para lograr esto, en algunos casos, es necesario realizar una orto-rectificación de las imágenes obtenidas, la cual consiste en eliminar cualquier distorsión provocada por la perspectiva o el relieve del terreno. Se realizó sobre un grupo de imágenes la orto-rectificación con el programa OpenSFM (url: <http://opensfm.readthedocs.io/en/latest/using.html>) y se pudo observar que los cambios eran muy leves y en algunos casos nulos. Esto es debido a que las imágenes son obtenidas sobre terrenos sin variaciones significantes del relieve y, además, el dron utiliza el gimbal para que las fotos se obtengan de manera perpendicular al objetivo. A la combinación de las imágenes obtenidas para producir la orto-fotografía se lo referenciará como pegado de imágenes.

En este proyecto el pegado de imágenes se basa solamente en el contenido digital de cada imagen, no se utilizan meta-datos, como ser su ubicación geográfica. El motivo es que se pretende analizar el estado de un cultivo para poder tomar decisiones sobre la totalidad de una parcela, por lo tanto los meta-datos no son necesarios.

En esta etapa del proyecto se pretende realizar el pegado de imágenes con la menor intervención posible. Existen múltiples procedimientos para realizar el pegado, dependiendo de la información disponible. Los diferentes pasos que deben realizarse para lograr el pegado de imágenes serán descriptos a continuación.

3.1. Transformaciones

Previo a la alineación de imágenes, se necesita definir de que manera se va a establecer la relación que mapea los píxeles de una imagen con otra. Para esto existen varias posibilidades, desde modelos de transformación en 2 dimensiones, hasta modelos de perspectiva planar.

3.1.1. Transformaciones en 2D

Las transformaciones más simples que pueden suceder en 2D están ilustradas en la Figura 3.1 y van a ser descriptas a continuación:

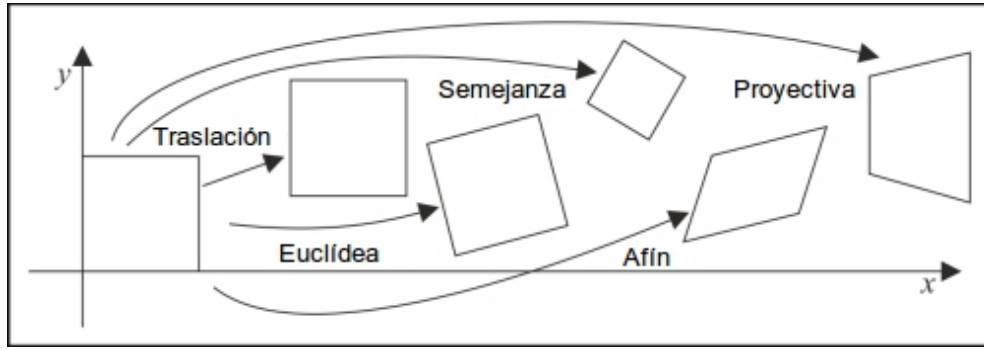


Figura 3.1: Transformaciones más simples en 2D. Adaptada de [9].

Traslación: En la transformación de traslación se desplaza cada uno de los píxeles de la imagen la misma magnitud en una determinada dirección. Puede ser escrita de las siguientes maneras

$$\mathbf{x}' = \mathbf{x} + \mathbf{t} \quad (3.1)$$

$$\mathbf{x}' = [\mathbf{I} \quad \mathbf{t}] \tilde{\mathbf{x}} \quad (3.2)$$

donde \mathbf{I} es la matriz de identidad de 2×2 y $\tilde{\mathbf{x}} = (x, y, 1)$ son las coordenadas homogéneas. En este caso se preserva la orientación, escala y ángulo de las líneas.

Rotación + Traslación: Esta transformación, además de realizar un desplazamiento, genera un giro de la imagen en torno a un punto fijo. También son conocidas como movimiento de cuerpo rígido o transformación euclídea en 2D, ya que la distancia euclídea se preserva. Puede ser escrita como

$$\mathbf{x}' = \mathbf{R}\mathbf{x} + \mathbf{t} \quad (3.3)$$

$$\mathbf{x}' = [\mathbf{R} \quad \mathbf{t}] \tilde{\mathbf{x}} \quad (3.4)$$

donde

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

es una matriz de rotación orto-normal con $\mathbf{R}\mathbf{R}^t = \mathbf{I}$ y $|\mathbf{R}| = 1$. En este caso se preserva el tamaño de la imagen.

Rotación y escalado: Además de las propiedades de la transformación anterior, se agrega un cambio uniforme de escala que agranda o reduce el tamaño de la imagen en la misma magnitud para todas las direcciones. También es conocida como transformación de semejanza, esta puede ser expresada como $\mathbf{x}' = s\mathbf{R}\mathbf{x} + \mathbf{t}$ donde s es un factor de escala aleatorio. Esto también se puede escribir como

$$\mathbf{x}' = [s\mathbf{R} \quad \mathbf{t}] \quad \mathbf{x}' = \begin{bmatrix} a & -b & t_x \\ b & a & t_y \end{bmatrix} \tilde{\mathbf{x}} \quad (3.6)$$

donde no se requiere más que se cumpla $a^2 + b^2 = 1$. En este caso se preservan los ángulos entre líneas.

Afín: Es similar a la transformación anterior, pero en este caso no se preservan los ángulos entre líneas, pero las líneas que eran paralelas se mantienen así. Puede ser escrita como $\mathbf{x}' = \mathbf{A}\tilde{\mathbf{x}}$, donde \mathbf{A} es una matriz arbitraria de 2×3 , también se puede ilustrar como,

$$\mathbf{x}' = \begin{bmatrix} a_{00} & a_{01} & a_{02} \\ a_{10} & a_{11} & a_{12} \end{bmatrix} \tilde{\mathbf{x}} \quad (3.7)$$

Proyectiva: Difiere con la transformación anterior en que no se preserva el paralelismo entre las líneas. La transformación proyectiva, también conocida como transformación de perspectiva u homografía, opera en coordenadas homogéneas tanto en $\tilde{\mathbf{x}}$ como en $\tilde{\mathbf{x}}'$,

$$\tilde{\mathbf{x}}' \sim \tilde{\mathbf{H}}\tilde{\mathbf{x}}, \quad (3.8)$$

donde \sim denota igualdad en escala y $\tilde{\mathbf{H}}$ es una matriz arbitraria de 3×3 . Notar que $\tilde{\mathbf{H}}$ es homogénea por sí misma, es decir, está definida solo para una escala. El resultado de la Ecuación 3.8, debe ser normalizado para obtener resultados no homogéneos $\tilde{\mathbf{x}}'$, de la siguiente manera:

$$x' = \frac{h_{00}x + h_{01}y + h_{02}}{h_{20}x + h_{21}y + h_{22}} \quad y' = \frac{h_{10}x + h_{11}y + h_{12}}{h_{20}x + h_{21}y + h_{22}} \quad (3.9)$$

Esta transformación preserva las líneas rectas.

Herencia de Transformaciones 2D: Lo anteriormente expresado se puede resumir en la Tabla 3.1. Las transformaciones descritas forman un conjunto anidado de grupos, es decir, estas son cerradas bajo la composición y su inversa es miembro del mismo grupo. El orden de la tabla sirve para establecer que cada una es subconjunto de las que le siguen debajo.

Nombre	Matriz	Grados de libertad	Preserva
Traslación	$[\mathbf{I} \mathbf{t}]_{2 \times 3}$	2	Orientación+...
Rígida(Euclídea)	$[\mathbf{R} \mathbf{t}]_{2 \times 3}$	3	Tamaño+...
Semejanza	$[s\mathbf{R} \mathbf{t}]_{2 \times 3}$	4	Ángulos+...
Afín	$[\mathbf{A}]_{2 \times 3}$	6	Paralelismo+...
Proyectiva	$[\tilde{\mathbf{H}}]_{2 \times 3}$	8	Líneas derechas

Cuadro 3.1: Herencia de transformaciones 2D. Las matrices de 2×3 son extendidas con una tercer fila $[\mathbf{0}^T 1]$ para formar una matriz de 3×3 para realizar transformaciones de coordenadas homogéneas.

3.1.2. Distorsión en la lente

Cuando las imágenes son tomadas por lentes de ángulo amplio, se suele necesitar modelar la distorsión producida por esto como una distorsión radial. Este modelo establece que las coordenadas observadas en la imagen pueden estar desplazadas alejándose (distorsión de barril u ojo de pez) o acercándose (distorsión de cojín) a su centro, en forma

proporcional a su distancia radial [Figura 3.2]. El modelo puede ser representado usando polinomios de bajo orden:

$$x' = x(1 + k_1r^2 + k_2r^4 + k_3r^6) \quad (3.10)$$

$$y' = y(1 + k_1r^2 + k_2r^4 + k_3r^6) \quad (3.11)$$

donde k_1 , k_2 y k_3 son llamados coeficientes de distorsión radial. Existen modelos más complejos pero para la realización del pegado de las imágenes este suele ser suficiente.

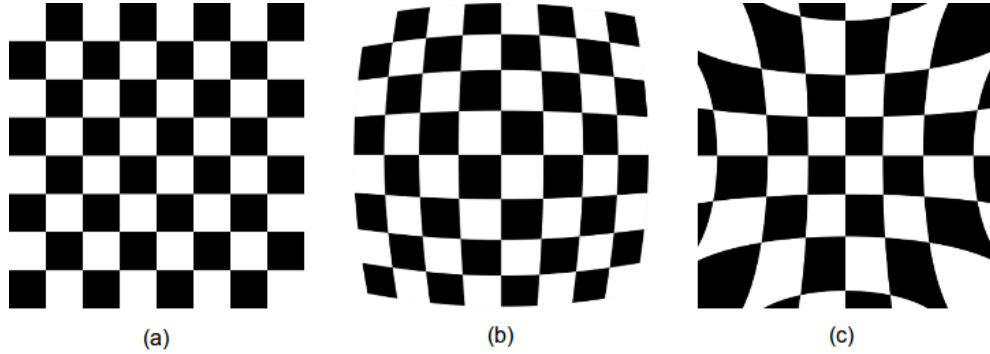


Figura 3.2: a - Imagen sin distorsión b - Distorsión radial positiva c - Distorsión radial negativa. Adaptada de [10].

Existen varias técnicas para estimar la distorsión radial. La más común es tomar una serie de fotos a una escena con varias líneas rectas, especialmente si estas están alineadas con los bordes de las imágenes y cerca de estos. En base a esto los parámetros de la distorsión pueden ser ajustados hasta que todas las líneas de la imágenes estén rectas.

Otro efecto que suele aparecer en las imágenes es la distorsión tangencial, que ocurre cuando la lente no está perfectamente paralela al plano de imagen (plano formado por los sensores). Esta puede ser corregida con el siguiente modelo:

$$x' = x + [2p_1xy + p_2(r^2 + 2x^2)] \quad (3.12)$$

$$y' = y + [p_1(r^2 + 2y^2) + 2p_2xy] \quad (3.13)$$

donde p_1 y p_2 , llamados coeficientes de distorsión tangencial, también pueden ser obtenidos con la técnica antes nombrada. Estos parámetros en conjunto con los que se utilizan para estimar la distorsión radial son llamados coeficientes de distorsión $(k_1, k_2, p_1, p_2, k_3)$ [10].

3.2. Puntos claves

Una vez que se determine la transformación apropiada para el pegado de las imágenes, se necesita alguna manera de estimar los parámetros pertenecientes a cada modelo, para lo cual existen varios métodos. Entre estos se encuentra el enfoque directo, el cual desplaza o deforma las imágenes y realiza una comparación píxel a píxel a modo de calcular que tan bien alineadas están. Lo importante en este enfoque es elegir una métrica para el error, luego se debe implementar una forma de minimizar el mismo. La forma más simple para esto es probar todas las alineaciones posibles, lo cual puede ser muy lento. Otra

posibilidad es la de utilizar propiedades de las transformadas de Fourier para acelerar el procesamiento. Un mejor enfoque es el de extraer puntos claves (también llamados características) de cada imagen, asignar una correspondencia entre los puntos de una imagen y otra, y con esta relación estimar los parámetros de la transformación utilizando alguna de las representaciones matemáticas vistas en la sección 3.1. La utilización de puntos claves es el método que se aplicará, por lo que va a ser desarrollado en esta sección.

El análisis se va a desarrollar en 4 pasos:

- Detección de los puntos claves.
- Describir los puntos claves para que puedan ser comparados.
- Encontrar las correspondencias entre los puntos claves de las distintas imágenes.
- Estimar los parámetros de la transformación que se utilice.

Previo a comenzar el análisis, se definirá como punto clave a una parte en una imagen que, en conjunto con otros, sirve para representar la escena o algún objeto presente en esta, es decir, si veo otra imagen de la misma escena o que tiene un objeto en común, debería poder encontrar los mismos puntos claves. Esto está ilustrado en la Figura 3.3 para una mejor comprensión.

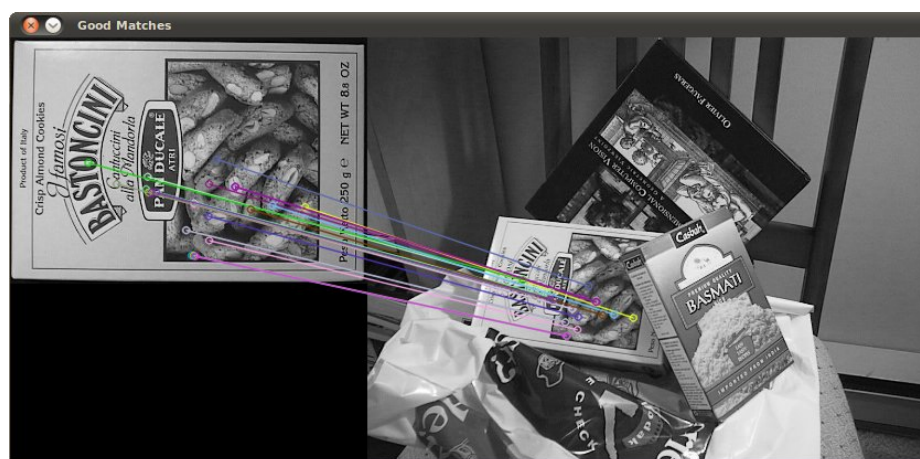


Figura 3.3: Puntos claves de un objeto en 2 imágenes diferentes, obtenida de [11].

3.2.1. Detección de puntos claves

Para comenzar con la detección hay que definir que zonas de una imagen podrían ser buenas para que si obtengo otra imagen de la misma escena, desde una perspectiva diferente, pueda identificar en ambas los mismos puntos claves. Teniendo en cuenta la Figura 3.4 donde se ilustran plantas de trigo sobre piso de cemento, se puede ver que hay partes homogéneas en el piso que si se tomarían como puntos claves podrían confundirse con cualquier otra parte del piso. También se ven partes del tallo, rectas y uniformes, que si se utilizarían como características se podrían confundir con otras partes del tallo. A ambas situaciones se las conoce como problema de apertura. En la Figura 3.5 se hicieron

acercamientos al piso y al tallo del trigo de la Figura 3.4 para que se pueda apreciar como algunas parte del piso son iguales a otras partes del mismo, y como algunas partes del tallo son iguales a otras partes del mismo generando el problema de apertura. En sentido opuesto, sería conveniente para describir la imagen utilizar el tallo del trigo, las espigas y algún que otro desperfecto en el suelo. En otras palabras, las partes que mejor describen la imagen son los bordes irregulares y esquinas, ya que no tienen nada en su vecindad que se pueda confundir con estas.

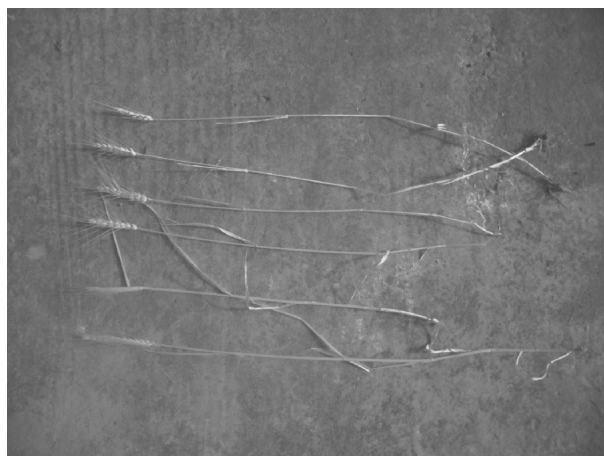
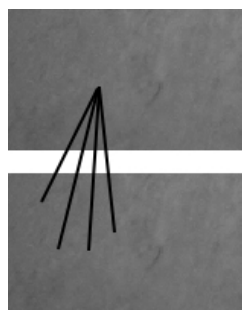
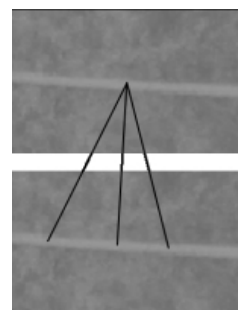


Figura 3.4: Trigo.



(a) Problema de apertura en zona homogénea.



(b) Problema de apertura en zona bordes.

Figura 3.5: Problema de apertura.

Es importante mencionar que lo que se busca en las imágenes no son aspectos tan significativos como una cara, un libro u otros objetos, sino que, se van a utilizar patrones en los píxeles que, aunque parezcan aleatorios, no lo son. En otras palabras, nosotros como humanos no utilizaríamos algunos de esos patrones para describir la imagen pero para un algoritmo de visión computacional estos son matemáticamente buenos lugares para ser usados como puntos claves.

3.2.1.1. Formulación Matemática

Una vez que se decidió que es lo que se busca, hay que determinar una forma de expresarlo matemáticamente. La solución propuesta para esto es la de comparar una

parte de la imagen con desplazamientos en diferentes direcciones. Para lograrlo se aplica una ventana sobre una imagen para obtener un bloque de píxeles, luego se utiliza la misma ventana desplazada para obtener un conjunto de píxeles vecinos y por último se realiza una sumatoria de la comparación píxel a píxel de estas. Lo anterior se puede expresar como la siguiente suma de diferencias cuadradas:

$$E(u, v) = \sum_i (I(\mathbf{x}_i)v(\mathbf{x}_i) - I(\mathbf{x}_i)v(\mathbf{x}_i + \mathbf{u}))^2 \quad (3.14)$$

$$= \sum_{\mathbf{x}_i \in V} (I(\mathbf{x}_i) - I(\mathbf{x}_i + \mathbf{u}))^2 \quad (3.15)$$

donde $I(\mathbf{x}_i)$ es la imagen que se está analizando muestreada en valores discretos $\{\mathbf{x}_i = (x_i, y_i)\}$, $v(\mathbf{x}_i)$ es una ventana con valor igual a cero fuera del área de interés V , y $\mathbf{u} = (u, v)$ es el desplazamiento. En caso de que haya algún punto clave, el valor obtenido debería ser pequeño para el centro de la ventana, y grande para cualquier dirección en la que se realicen los desplazamientos, lo cual hace que nuestro interés sea buscar el mínimo.

Para facilitar los cálculos se hace una expansión de $E(u, v)$ usando series de Taylor, en el punto $(u, v) = (0, 0)$ obteniendo:

$$E(u, v) \approx \sum_{\mathbf{x}_i \in V} (I(\mathbf{x}_i) - (I(\mathbf{x}_i) + u \frac{\partial I(\mathbf{x}_i)}{\partial x} + v \frac{\partial I(\mathbf{x}_i)}{\partial y}))^2 \quad (3.16)$$

$$\approx \sum_{\mathbf{x}_i \in V} (u \frac{\partial I(\mathbf{x}_i)}{\partial x} + v \frac{\partial I(\mathbf{x}_i)}{\partial y})^2 \quad (3.17)$$

$$\approx \sum_{\mathbf{x}_i \in V} u^2 \frac{\partial I(\mathbf{x}_i)}{\partial x} + 2uv \frac{\partial I(\mathbf{x}_i)}{\partial x} \frac{\partial I(\mathbf{x}_i)}{\partial y} + v^2 \frac{\partial I(\mathbf{x}_i)}{\partial y} \quad (3.18)$$

$$\approx \sum_{\mathbf{x}_i \in V} [u \quad v]^t \begin{bmatrix} \frac{\partial I(\mathbf{x}_i)}{\partial x} & \frac{\partial I(\mathbf{x}_i)}{\partial x} \frac{\partial I(\mathbf{x}_i)}{\partial y} \\ \frac{\partial I(\mathbf{x}_i)}{\partial x} \frac{\partial I(\mathbf{x}_i)}{\partial y} & \frac{\partial I(\mathbf{x}_i)}{\partial y} \end{bmatrix} [u \quad v] \quad (3.19)$$

donde

$$H = \begin{bmatrix} \sum_{\mathbf{x}_i \in V} \frac{\partial I(\mathbf{x}_i)}{\partial x} & \sum_{\mathbf{x}_i \in V} \frac{\partial I(\mathbf{x}_i)}{\partial x} \frac{\partial I(\mathbf{x}_i)}{\partial y} \\ \sum_{\mathbf{x}_i \in V} \frac{\partial I(\mathbf{x}_i)}{\partial x} \frac{\partial I(\mathbf{x}_i)}{\partial y} & \sum_{\mathbf{x}_i \in V} \frac{\partial I(\mathbf{x}_i)}{\partial y} \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

$$= \begin{bmatrix} \sum_{\mathbf{x}_i \in V} I_x^2 & \sum_{\mathbf{x}_i \in V} I_x I_y \\ \sum_{\mathbf{x}_i \in V} I_x I_y & \sum_{\mathbf{x}_i \in V} I_y^2 \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

es llamada matriz de Harris y los subíndices en I_x y I_y denotan derivadas espaciales. Entonces, si lo que buscamos es que el bloque de píxeles, con centro en (x_0, y_0) y limitados por la ventana, tenga un mínimo en su centro, sería de nuestro interés obtener los autovalores para saber las direcciones en las que este crece. Si estos son pequeños significa que estamos en un bloque de píxeles muy parecidos (zona homogénea), si solo uno de ellos es grande se debe a que solo crece en una dirección (presencia de borde), mientras que, si ambos son grandes es debido a que se encontró un mínimo.

El mínimo autovalor no es el único parámetro que puede usarse para encontrar características de una imagen. Otro valor que se puede utilizar es el denominado por Harris y Stephens cómo medida de calidad:

$$C = \det(\mathbf{H}) - \alpha \text{tr}(\mathbf{H})^2 = \lambda_0 \lambda_1 - \alpha(\lambda_0 + \lambda_1)^2 \quad (3.22)$$

con α entre 0.04 – 0.06. Por otro lado, Triggs (2004) propone usar

$$\lambda_0 - \alpha \lambda_1 \quad (3.23)$$

lo que reduce la respuesta en esquinas de 1 dimensión, donde el error de aliasing a veces afecta a los autovalores más pequeños. Mientras que Brown et al. (2005) usa la media armónica:

$$\frac{\det \mathbf{H}}{\text{tr} \mathbf{H}} = \frac{\lambda_0 \lambda_1}{\lambda_0 + \lambda_1} \quad (3.24)$$

la cual es una función suavizante en la región donde $\lambda_0 \approx \lambda_1$. La detección de puntos claves por medio de la utilización de autovalores está ilustrada en la Figura 3.6, donde hay 4 imágenes y sus respectivos gráficos de la función $E(u, v)$. Se pueden ver que los 2 primeros casos son malos para usarlos como puntos claves, ya que, generan el problema de la apertura antes nombrado. Por otro lado, los últimos 2 casos si pueden ser utilizados para esa finalidad, y esto se puede ver reflejado en los gráficos, debido a que, presentan los mínimos buscados. Lo dicho anteriormente se ve en los valores de λ .

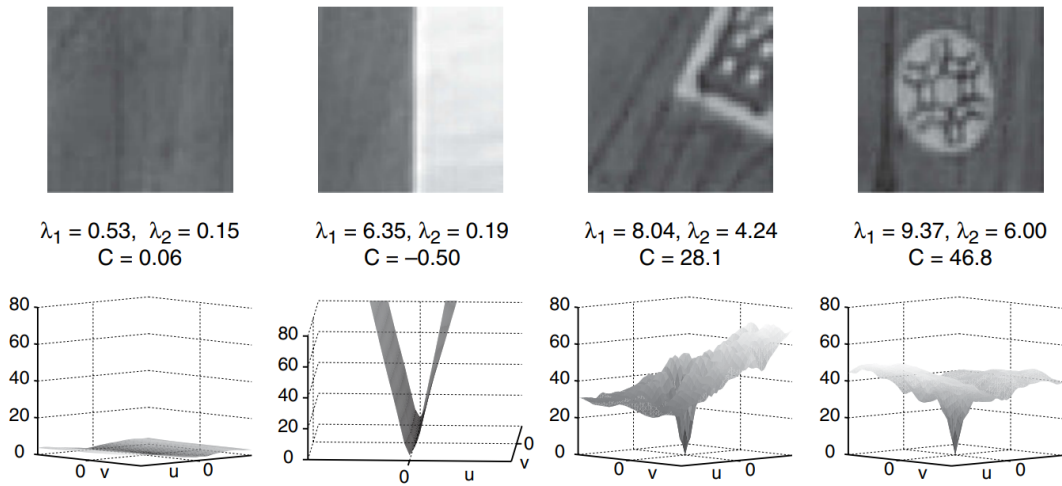


Figura 3.6: Fila superior: zonas que son posibles puntos claves. Fila del medio: autovalores de la matriz de Harris y la medida de calidad C con $\alpha = 0.04$. Fila de abajo: Suma de diferencias cuadradas $E(u, v)$, obtenida de [12].

Debido a que nuestro mayor interés es sobre el píxel central del bloque que se está analizando, sería apropiado buscar una manera de que se le de mayor importancia a este, y a los que están más cerca de él, que a los que están más alejados. Esto hace que utilizar una ventana cuadrada no sea la mejor opción, por lo que se propone reemplazarla por una función gaussiana ponderada.

La matriz de Harris y los auto-valores de la imagen pueden ser eficientemente evaluados usando una secuencia de filtros y operaciones algebraicas:

$$G_x(\mathbf{x}) = \frac{\partial}{\partial x} G_{\sigma_d}(\mathbf{x}) * I(\mathbf{x}), \quad (3.25)$$

$$G_y(\mathbf{x}) = \frac{\partial}{\partial y} G_{\sigma_d}(\mathbf{x}) * I(\mathbf{x}), \quad (3.26)$$

$$\mathbf{B}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} G_x^2(\mathbf{x}) & G_x(\mathbf{x})G_y(\mathbf{x}) \\ G_x(\mathbf{x})G_y(\mathbf{x}) & G_y^2(\mathbf{x}) \end{bmatrix}, \quad (3.27)$$

$$\mathbf{A}(\mathbf{x}) = G_{\sigma_i} * \mathbf{B}(\mathbf{x}) \quad (3.28)$$

donde G_{σ_d} es un filtro derivativo pre-suavizante reductor de ruido de tamaño σ_d , y G_{σ_i} es un filtro cuya escala σ_i controla el tamaño efectivo de la ventana.

3.2.1.2. Espacio escalar

El procesamiento de imágenes a diferentes escalas es una herramienta muy importante, ya que se puede abstraer una imagen detectando automáticamente puntos claves a diferentes niveles de escala. La ventaja con este enfoque es que se obtienen detectores invariantes a la escala, esto es, detectar características a diferentes resoluciones.

La idea principal en los métodos de multi-escala es simple: Crear un espacio escalar de una imagen filtrándola con una función mientras se modifica la escala. En el caso del espacio escalar Gaussiano, esto se logra convolucionando la imagen original con un núcleo Gaussiano con diferentes desviaciones estándar como se vio en las Ecuaciones 3.25 y 3.26. Para núcleos más grandes, se obtienen representaciones de la imagen más simples. Con la representación de la imagen a multi-escala, se pueden detectar características a diferentes resoluciones. Sin embargo, es importante notar que el espacio escalar gaussiano es solo un ejemplo de difusión lineal, ya que otros espacios escalares lineales son también posibles.

El núcleo Gaussiano puede ser la opción más simple, sin embargo, tiene algunos problemas. Este espacio escalar tiene la particularidad de que realiza un difuminado que reduce el ruido, al costo de disminuir el detalle de los objetos pertenecientes a la imagen. La pérdida de información se incrementa mientras el escalado aumenta.

Resulta más apropiado hacer un difuminado que se adapte a la información de la imagen para que solo se reduzca el ruido, pero que los detalles y bordes se mantengan sin afectarse. Para lograrlo, existen diferentes espacios escalares no lineales que fueron propuestos para mejorar el enfoque del espacio escalar Gaussiano. A modo de ejemplo en la fila superior de la Figura 3.7 se aprecian imágenes con varios difuminados con Diferencia de Gaussianos a distintas escalas y en la fila de abajo se ilustran las mismas imágenes pero con un difuminado con filtro de difusión no lineal a distintas escalas donde se puede apreciar como el difuminado se adapta a la información de la imagen.

3.2.1.3. AKAZE

El método que se va a utilizar en este proyecto, es llamado AKAZE (Accelerated KAZE) [14]. Este se lleva a cabo por medio de filtros de difusión no lineales para los



Figura 3.7: Difuminado con Diferencia de Gaussianos (arriba), Difuminado con filtro de difusión no lineal (abajo), obtenida de [13].

cuales se requiere resolver Ecuaciones Diferenciales Parciales (EDP):

$$\frac{\partial L}{\partial t} = \text{div}(c(x, y, t) \cdot \nabla L), \quad (3.29)$$

donde div y ∇ son los operadores de divergencia y gradiente, respectivamente. Gracias a la introducción de la función de conductividad c en la ecuación de difusión, es posible hacer que el filtro sea adaptable a la estructura local de la imagen. El tiempo t es el parámetro de escala, donde valores más grandes van a dar representaciones más simples de la imagen. La función c se define como:

$$c(x, y, t) = g(|\nabla L_\sigma(x, y, t)|), \quad (3.30)$$

donde ∇L_σ es el gradiente de una versión suavizada, por medio de un Gaussiano, de la imagen L . Se considera una de las dos funciones de conductividad introducidas por Perona y Malik, aunque otras también son posibles. La función g_2 promueve regiones amplias sobre las pequeñas:

$$g_2 = \frac{1}{1 + \frac{|\nabla L_\sigma|^2}{\lambda^2}}$$

Donde el parámetro λ es el factor de contraste que controla el nivel de difusión y determina que bordes van a ser resaltados o mantenidos y cuales van a cancelarse.

Debido a que no hay solución analítica para la EDP involucrada en el filtro de difusión no lineal, se necesita usar algún método numérico para realizar una aproximación. En un enfoque anterior llamado KAZE [13] propone utilizar un esquema denominado División del Operador Aditivo (DOA), el cual discretizaba la Ecuación 3.29 por medio de un esquema semi-implícito de Euler que, si bien daba buenos resultados y era estable para cualquier tamaño de paso $\partial t = \tau$, era computacionalmente costoso. Para solucionar esto se propuso AKAZE, el cual también requiere una aproximación de EDP pero usa un método más rápido para crear espacios escalares no lineales llamado Difusión Explícita Rápida (DER) que combina las ventajas de los esquemas explícitos y semi-implícitos mientras que evita sus defectos. La idea principal es realizar M ciclos de n pasos de difusión explícitos

variando los tamaños de los pasos τ_j que se originan a partir de la factorización de un filtro de caja:

$$\tau_j = \frac{\tau_{max}}{2 \cos^2 \pi \frac{2j+1}{4n+2}}. \quad (3.31)$$

donde τ_{max} es el máximo tamaño de paso que no viola la condición de estabilidad del esquema explícito. El correspondiente tiempo de parada de un ciclo de EDF es obtenido como:

$$\theta_n = \sum_{j=0}^{m-1} \tau_j = \tau_{max} \frac{n^2 + n}{3}.$$

La discretización que se utiliza para este método es explícita y teniendo en cuenta la Ecuación 3.29 se formula de la siguiente manera:

$$\frac{L^{i+1} - L^i}{\tau} = \sum_m^{l=1} A_l(L^i) L^{i+1}, \quad (3.32)$$

donde $A(L_i)$ es una matriz que codifica la conductividad para una imagen y τ es un paso de tiempo constante que respeta la regla $\tau < \tau_{max}$ para que se mantenga la condición de estabilidad. En el esquema explícito, la solución L^{i+1} se obtiene de una manera directa por medio de la solución del paso anterior L^i y la conductividad $A(L_i)$:

$$L^{i+1} = (I + \tau \sum_m^{l=1} A_l(L^i)) L^i. \quad (3.33)$$

El método utiliza el esquema EDF para construir un espacio escalar no lineal considerando una difusión anisotrópica. Para procesar más rápido su construcción, se combina con un marco de trabajo piramidal donde además de modificar la escala, se realiza un submuestreo de la imagen para disminuir los cálculos necesarios [Figura 3.8].

Para detectar los puntos claves, se obtiene el determinante del Hessiano para cada imagen dilatada L^i en el espacio escalar no lineal. El conjunto de los operadores diferenciales multi-escala son normalizados con respecto a la escala, utilizando un factor normalizado que tiene en cuenta la octava de cada imagen en el espacio.

$$L_{Hessiano}^i = \sigma_{i,norm}^2 (L_{xx}^i L_{yy}^i - L_{xy}^i L_{xy}^i). \quad (3.34)$$

Para obtener las segundas derivadas hacemos uso de la concatenación de filtros de Scharr con un tamaño de paso $\sigma_{i,norm}$. Primero buscamos el máximo de la respuesta del detector en el espacio. Para esto, en cada nivel i , verificamos que la respuesta del detector es mayor que una tolerancia y que sea al máximo en una ventana de 3x3 píxeles, con lo que descartamos rápidamente respuestas que no son máximos. Luego para cada posible máxima, verificamos que la respuesta sea máxima con respecto a otros puntos claves del nivel $i + 1$ y $i - 1$ en una ventana de $\sigma_i \times \sigma_i$ píxeles.

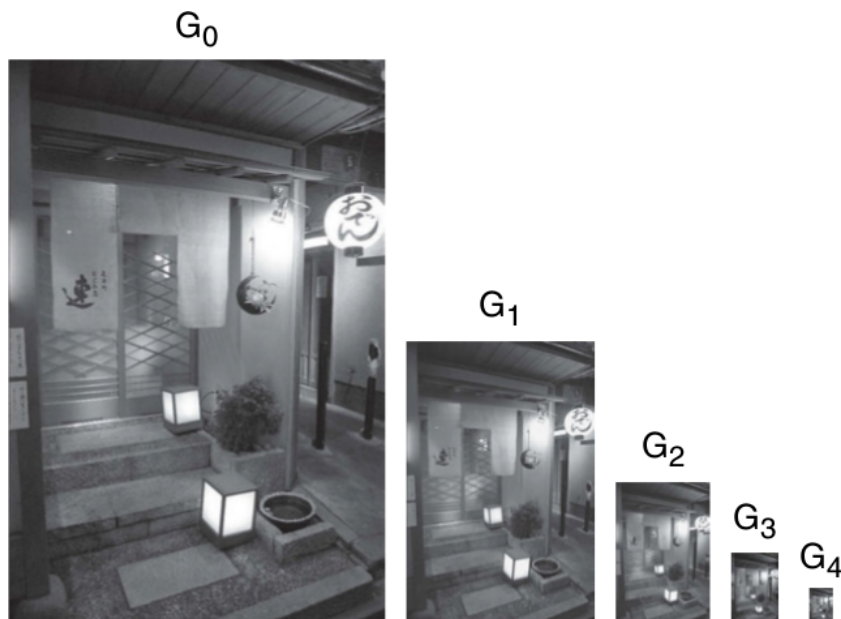


Figura 3.8: Ejemplo de marco de trabajo piramidal con espacio escalar gaussiano. Adaptada de [12].

3.2.2. Descripción de puntos claves

Una vez que encontramos los puntos claves correspondientes a cada imagen, necesitamos una manera de poder establecer una correspondencia entre los de una imagen y otra. Si se toma una región alrededor de un punto clave se podría dar una descripción del área y en base a esta buscar la misma región en otra imagen, por ejemplo, si un área es un punto negro con fondo azul, en otra imagen se podría buscar lo mismo. Lo que se quiere hacer es simular esto de una manera que se pueda realizar automáticamente en una computadora.

Para realizar la descripción se pueden referenciar dos enfoques. Uno es llamado Histograma de Gradientes, cuyo pensamiento esencial es que la apariencia y forma de un objeto en una imagen puede ser descrito por la distribución de la intensidad de los gradientes. El área a analizar es dividida en pequeñas celdas conectadas y para cada píxel dentro de estas se realiza un histograma con las direcciones (y en algunos casos la magnitud) [Figura 3.9]. Por último, se genera el descriptor concatenando los histogramas. El problema en esto es que se tiene que calcular el gradiente en cada píxel de la ventana, lo que tiene grandes costos de procesamiento. El otro enfoque utiliza descriptores binarios, donde se codifica la mayoría de la información de una ventana como una cadena de bits utilizando solo una comparación de la intensidad de las imágenes. Una de las ventajas de esto es el rápido procesamiento, ya que solo se requiere un simple análisis de semejanza de intensidades.

Los descriptores binarios se han estado utilizando mucho últimamente ya que su procesamiento y emparejamiento con otros descriptores funcionan en forma eficiente. Por lo que en el enfoque AKAZE, se propone utilizar el descriptor conocido como Diferencia Local Binaria (DLB) al cual se le pueden aplicar modificaciones para que sea invariante a la escala y a la orientación y además para explotar la información del gradiente del espacio escalar no lineal [14].

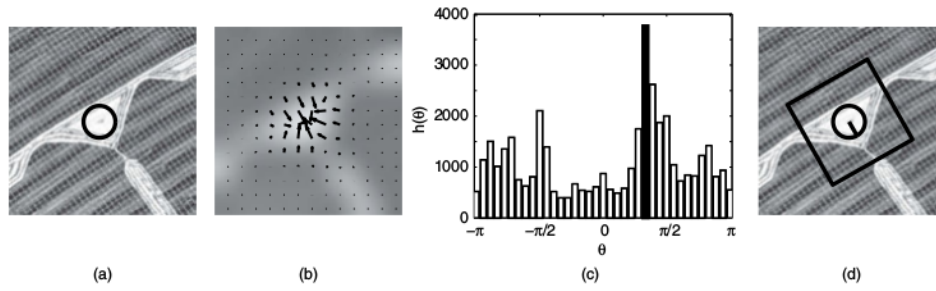


Figura 3.9: Estimando la orientación dominante de un punto clave. (a) Punto clave detectado. (b) Direcciones de los gradientes para los puntos que se encuentren en la vecindad del punto clave. (c) Histograma de gradientes con un máximo cerca de $\pi/3$ radianes. (d) La orientación estimada del punto clave, indicada por la línea dentro del círculo, obtenida de [12].

3.2.2.1. Diferencia Local Binaria

Para mantener baja demanda computacional y disminuir la magnitud de almacenamiento, se utiliza una versión modificada del enfoque conocido como Diferencia Local Binaria [15]. Este método está inspirado en el descriptor de auto similitud [16] en el cual la ventana de una imagen es dividida en cuadrículas y se realiza la correlación cruzada entre el centro y sus otras celdas. Debido a que la mayoría de los cambios fotométricos (iluminación, contraste, difuminado, ruido, etc) puede ser removido mediante la diferencia entre dos sub-regiones, este método es resistente a estos cambios. Sin embargo el procesamiento para esto requiere que se realice suma de diferencias cuadradas para cada píxel, lo cual es muy caro y no puede ser acelerado por medio de imágenes integrales.

Lo que se hace en este método es dividir cada área que se busque describir en una cuadrícula de $n \times n$ celdas del mismo tamaño, extraer información representativa de cada una y realizar una evaluación binaria τ en un par de celdas i y j :

$$\tau(Func(i), Func(j)) := \begin{cases} 1 & \text{si } (Func(i) - Func(j)) > 0 \text{ y } i \neq j \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases}, \quad (3.35)$$

donde $Func(\cdot)$ es la función para extraer la información sobre una celda.

La información utilizada para el test binario determina tanto la diferencia como eficiencia de un descriptor. Lo más básico y rápido de procesar es el promedio de la intensidad, que se puede obtener por medio de la técnicas de imagen integral [17]. Sin embargo esta información es muy simple como para describir el cambio de intensidades entre cada celda, por ejemplo, una celda con un gris homogéneo va a tener el mismo promedio de intensidad que una que es mitad negra y mitad blanca aunque sus valores y distribución de intensidades sean diferentes [Figura 3.10]. Para solucionar esto se agrega el gradiente de primer orden que es más resistente a cambios fotométricos que el promedio de las intensidades y también puede procesar cambios en las intensidades dentro de cada celda. Además, los gradientes pueden ser obtenidos por filtros de caja, lo cual puede ser fácilmente acelerado con imágenes integrales.

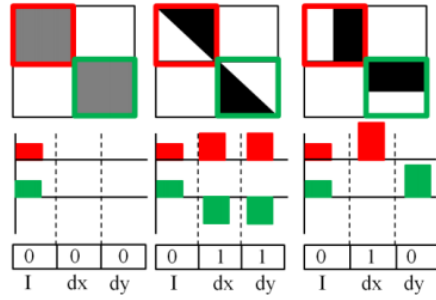


Figura 3.10: Ilustración de evaluaciones binarias en los pares diagonales de tres ventanas de una imagen, obtenida de [15].

Teniendo en cuenta lo antes dicho, se puede definir la función para este enfoque como:

$$Func_{intensidad}(i) := \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m Intensidad(k) \quad (3.36)$$

$$Func_{dx}(i) := Gradiente_x(i) \quad (3.37)$$

$$Func_{dy}(i) := Gradiente_y(i) \quad (3.38)$$

donde m es la cantidad de píxeles en la celda i .

Realizando la evaluación binaria descrita en la Ecuación 3.35 se obtienen 3 bits por cada par de celdas, siendo N la cantidad total de celdas, se va a obtener una cadena de $3N(N-1)/2$ bits.

Uno de los parámetros a definir es el tamaño de la cuadrícula, el cual influye en la robustez del descriptor. Si se usa una gran cantidad de celdas pequeñas se van a describir mejor algunos patrones locales, pero si se divide en una pequeña cantidad de celdas grandes los resultados van a ser más estables. Por lo que se aplica una estrategia de utilizar varios tamaños de cuadrícula. Cada ventana de la imagen va a ser particionada en, por ejemplo, 2x2, 3x3 y 4x4, de las cuales se obtienen sus cadenas binarias y se concatenan. La desventaja de esto es que se va a obtener una cadena muy larga, por lo cual se propone implementar un método de selección de bits que sean redundantes. Para esto se proponen el siguiente método:

- Selección de bits aleatoria: Se seleccionan aleatoriamente n_d bits únicos del total de N y se aplica la misma selección para procesar los n_d -dimensionales DLB descriptores para todas las imágenes.

3.2.2.2. Diferencia Local Binaria Modificado

La desventaja de DLB es que no es invariante a la rotación ni a la escala, por lo cual en [14] se proponen algunas modificaciones para así lograr cubrir estas falencias.

La utilización de imágenes integrales para considerar la rotación de los puntos claves, y visitar todos los puntos en una subdivisión rotada puede ser muy caro en tiempos de procesamiento. Por lo que se propone lograr la invarianza rotacional estimando la orientación principal del punto clave y rotar el cuadrículado con el mismo ángulo de rotación. En lugar de usar el promedio de todos los píxeles dentro de cada subdivisión en la cuadrícula, se realiza un submuestreo de esta en pasos que sean una función de la

escala σ de la característica descriptiva. Hacer que el muestreo sea dependiente de la escala hace el descriptor robusto en cuanto a cambios de escala. Este proceso puede ser visto en [figref]. Además, M-LDB utiliza las derivadas obtenidas en la detección de características, reduciendo el número de operaciones requeridas para obtener el descriptor.

3.2.3. Emparejar puntos claves

Una vez que se sabe la localización de cada punto clave y se le asoció un descriptor que permita compararlo con otros, se requiere establecer una manera de emparejar los de una imagen con los de otra.

En esta sección primero se va a hablar sobre métodos de emparejar los puntos claves de distintas imágenes, los cuales van a depender del tipo de descriptor (binario o HOS). Luego se definirán formas de eliminar pares de puntos que se consideren emparejamientos falsos, donde cada enfoque van a variar en robustez y rapidez de procesamiento. Por último se van a desarrollar formas de aproximar los parámetros de la transformación a utilizar.

3.2.3.1. Métodos de emparejamiento

La manera más fácil de encontrar todas las correspondencias es comparar todos los puntos claves de una imagen con todos los de la otra, utilizando alguna métrica que mida el parecido entre los descriptores. Una forma de obtener un resultado más consistente es realizar una verificación cruzada donde, además de comparar el conjunto de puntos de la imagen A con los de la imagen B, también se comparan los de B con A, es decir, las características que sean emparejadas deben ser mutuamente el vecino más cercano. Lamentablemente, esto es muy costoso, lo que lo hace impráctico para algunas aplicaciones.

Algoritmos de emparejamiento más eficientes pueden ser ideados usando diferentes tipos de esquemas de indexación, muchos de los cuales están basados en la idea de encontrar los vecinos más cercanos en espacios de muchas dimensiones.

Para realizar el emparejamiento de los puntos claves se necesita establecer una métrica que permita compararlos, lo cual va a depender del tipo de descriptor a utilizar. Como se vio anteriormente conocemos dos tipos de descriptores, aquellos basados en el histograma de gradientes y los binarios. Para cada uno se propone una manera de establecer una distancia que defina que tan parecidos son, y en base a esto poder decidir cuales son pares:

- **Distancia Euclídea:** Es la distancia de una línea recta entre 2 puntos en el espacio euclídeo. Es útil para el caso de los descriptores basados en el Histograma de Gradientes, ya que, suelen estar representados por un vector n-dimensional, el cual puede ser comparado con otro por medio de esta distancia.
- **Distancia de Hamming:** La distancia de Hamming entre dos cadenas de la misma longitud, es el número de posiciones para las cuales los correspondientes símbolos eran diferentes, es decir, mide la mínima cantidad de sustituciones necesarias para que las cadenas sean iguales. Para dos cadenas binarias, esta distancia es equivalente a la cantidad de unos en una operación XOR, por lo cual es útil implementarlo en los descriptores binarios.

3.2.3.2. Remover pares falsos

Una vez que se tiene un conjunto inicial de correspondencias entre puntos claves, es necesario encontrar un subconjunto de estos que produzcan un alineado de alta precisión. Un enfoque posible es simplemente procesar la estimación de mínimos cuadrados o realizar una versión más robusta de esta. Sin embargo, en muchos casos es mejor primero encontrar un buen conjunto inicial de correspondencias correctas, es decir, puntos que son consistentes con la transformación a utilizar.

Dos soluciones extensamente usadas para estos problemas son RANSAC (RANDOM SAMPLE CONSENSUS) y Menor Mediana de Cuadrados. Ambas técnicas comienzan seleccionando un subconjunto aleatorio de k correspondencias, el cual es usado para procesar una estimación de la transformación \mathbf{p} . El residuo del conjunto entero de correspondencias es obtenido de la siguiente manera:

$$\mathbf{r}_i = \tilde{\mathbf{x}}'_i(\mathbf{x}_i; \mathbf{p}) - \hat{\mathbf{x}}'_i, \quad (3.39)$$

donde $\tilde{\mathbf{x}}'_i$ es la ubicación estimada, y $\hat{\mathbf{x}}'_i$ son las localizaciones de las características detectadas.

La técnica RANSAC luego cuenta la cantidad de correspondencias que cumplan $\|\mathbf{r}_i\| \leq \epsilon$ (denominadas inliers), donde ϵ es una tolerancia cuyo valor por lo general es entre 1 y 3 píxeles. Por otro lado, la menor mediana de cuadrados utiliza la mediana de los valores $\|\mathbf{r}_i\|$.

Este proceso de selección aleatoria es repetido S veces, y el set con más inliers, o menor mediana de residuos, se mantiene como la solución final. Para asegurar que la selección aleatoria tiene altas probabilidades de encontrar correspondencias correctas, se necesita realizar una suficiente cantidad de pruebas S . Siendo p la probabilidad de que una correspondencia sea valida, y P la probabilidad total de éxito después de probar S veces. La posibilidad de que en una prueba todas las muestras aleatorias k sean correctas es p^k . Por lo tanto se puede decir que la probabilidad de que las pruebas fallen es:

$$1 - P = (1 - p^k)^S, \quad (3.40)$$

y la mínima cantidad de pruebas requeridas es

$$S = \frac{\log 1 - P}{\log 1 - p^k}. \quad (3.41)$$

3.2.4. Aproximar transformaciones

Una vez que se tengan un conjunto de correspondencias que se consideren correctas, el próximo paso es estimar los parámetros \mathbf{p} de la transformación que alinea las imágenes de la mejor manera. La forma usual para hacer esto es usar mínimos cuadrados para minimizar la suma de los residuos cuadrados dados por,

$$E_{MC} = \sum_i \|\mathbf{r}_i\|^2 = \|\tilde{\mathbf{x}}'_i(\mathbf{x}_i; \mathbf{p}) - \hat{\mathbf{x}}'_i\|^2, \quad (3.42)$$

La mayoría de las transformaciones presentadas en la sección 3.1 tienen una relación lineal entre la transformación y los parámetros desconocidos \mathbf{p} . En este caso, una simple regresión lineal (mínimos cuadrados) usando la Ecuación $\mathbf{A}\mathbf{p} = \mathbf{b}$ funcionará bien. Por otro lado, cuando la relación es no lineal, es necesario hacer uso de una solución iterativa para obtener resultados precisos.

3.3. Proceso

Una vez comprendido lo antes mencionado se requirió adaptar las metodologías analizadas al problema del proyecto: la generación de orto-mosaicos con imágenes obtenidas por un vehículo aéreo no tripulado a una velocidad e intervalo de tiempo de captura de fotos que permita obtener un solapamiento vertical y horizontal suficiente para tener resultados óptimos.

Si bien la teoría mencionada anteriormente sirve para entender el proceso a gran escala, hay muchos pasos intermedios que deben realizarse para obtener un resultado final satisfactorio. En esta sección se desarrollaran todos los pasos necesarios y las pruebas que se fueron realizando.

3.3.1. Carga y pre-procesamiento de imágenes

Para comenzar con el proceso, se debe elegir que imágenes se van a utilizar y cargarlas para poder trabajar sobre ellas. Una vez realizado esto, puede ser necesaria la realización de los siguientes pre-procesos:

3.3.1.1. Calibrar la cámara

Como se dijo anteriormente, con el propósito de ampliar el ángulo de visión, algunas cámaras utilizan lentes que alteran la geometría de la imagen [Figura 3.11a]. Este efecto es algo común en las cámaras que tienen el tamaño necesario para caber en el gimbal que se utiliza.

Por medio de los modelos de distorsión, mencionados en 3.1.2, se implementó la técnica para obtener los coeficientes de distorsión, también mencionada en dicha sección, para calibrar la cámara obteniendo los resultados ilustrados en la Figura 3.11.



(a) Imagen con ojo de pez.

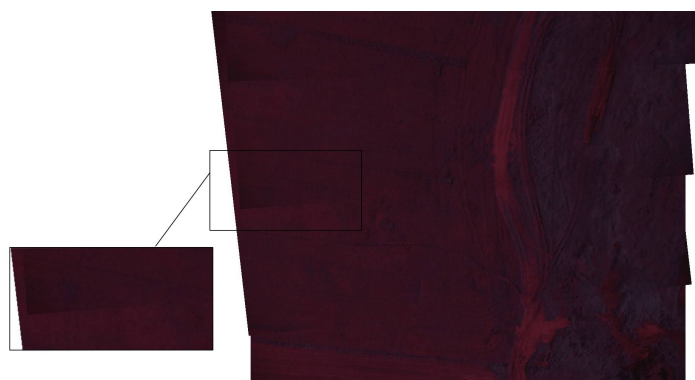
(b) Imagen sin ojo de pez.

Figura 3.11: imágenes con y sin distorsión de ojo de pez.

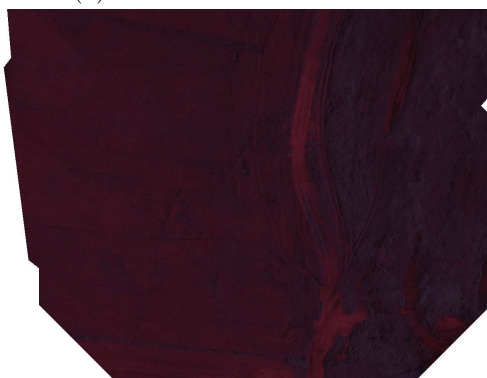
3.3.1.2. Remover efecto viñeta

El efecto viñeta es un defecto que tienen algunas cámaras provocado por su lente, en el cual los contornos de la imagen (en este caso solo las esquinas) se ven más oscuros.

Esto es difícil de percibir en una imagen, pero cuando se realiza el pegado de múltiples imágenes, afecta al resultado tanto visualmente, como a su transformación. La solución que se implementó, fue recortar las esquinas para así eliminar la información falsa del efecto. En la Figura 3.12a se ilustra una imagen con efecto viñeta a la cual se le realiza un acercamiento donde se puede apreciar el efecto y en la Figura 3.12b se puede ver la misma imagen con el efecto removido.



(a) Orto-mosaico con efecto viñeta.



(b) Orto-mosaico sin efecto viñeta.

Figura 3.12: imágenes con y sin efecto viñeta.

3.3.1.3. Redimensionar las imágenes

Las imágenes que se tienen que procesar tienen mucha resolución, por lo que su procesamiento puede llegar a requerir demasiado tiempo o, dependiendo de las características de la computadora, no poder realizarse. La solución propuesta para esto es disminuir su resolución para que sean más pequeñas, lo cual se pudo ver que no afecta el resultado y acelera el proceso. En caso de querer recuperar el tamaño original, se pueden adaptar las transformaciones para obtener el orto-mosaico con su verdadera dimensión.

3.3.2. Detección y descripción de los puntos claves de cada imagen

Como se dijo anteriormente, se va a hacer uso de AKAZE, tanto para detectar como para describir los puntos claves. Se han probado otros métodos, pero fueron descartados

debido a que daban malos resultados, no detectaban ningún punto o eran implementaciones de algoritmos patentados, lo cual limitaba su uso. Por lo que se concluyó que AKAZE es la mejor opción.

3.3.3. Emparejamiento de los puntos claves de una imagen con la consecutiva

Para hacer el emparejamiento de los puntos, se debió decidir el método y la métrica a aplicar. Como se dijo en la sección 3.2.3.1, existen varios algoritmos que conllevan menor costo de procesamiento que comparar todos los puntos claves pero, debido a que el tiempo que se ahorra en este caso práctico no es mucho, se decidió no arriesgar el desempeño y utilizar la comparación de todos los puntos acompañada de verificación cruzada.

Ya decidido que método se utilizará para elegir que puntos deben ser emparejados, se necesita establecer de que manera se van a comparar. El descriptor que se utiliza en A-KAZE es binario, por lo que se propone utilizar la distancia de Hamming como métrica. Esto se debe a que al utilizarla como medida de distancia entre dos cadenas binarias, el emparejamiento se puede realizar con una sola instrucción, ya que esta comparación es equivalente a la suma de operación XOR entre las cadenas.

3.3.4. Eliminar los pares falsos

Los emparejamientos previamente realizados son en base a la mínima distancia entre los descriptores de los puntos claves, lo cual no significa que la distancia sea baja, ni tampoco que el par sea correcto. Por esta razón, hay que remover los pares que consideremos que sean falsos, para el ojo humano esto puede ser fácil, pero se necesita una manera de automatizarlo. En la Figura 3.13 se pueden apreciar dos imágenes a las cuales se les detectaron, describieron y emparejaron los puntos claves y se encerraron con un círculo negro los pares falsos.

Primero se van a eliminar los pares cuya distancia pueda ser catalogada como error grosero. Metodológicamente se deben ordenar los pares en base a su distancia con un criterio de orden de menor a mayor, luego se eliminarán todos los que superen una distancia que se considere fuera del límite lógico aceptable. Para afinar la remoción de pares erróneos del conjunto restante se desarrollaron los siguientes criterios:

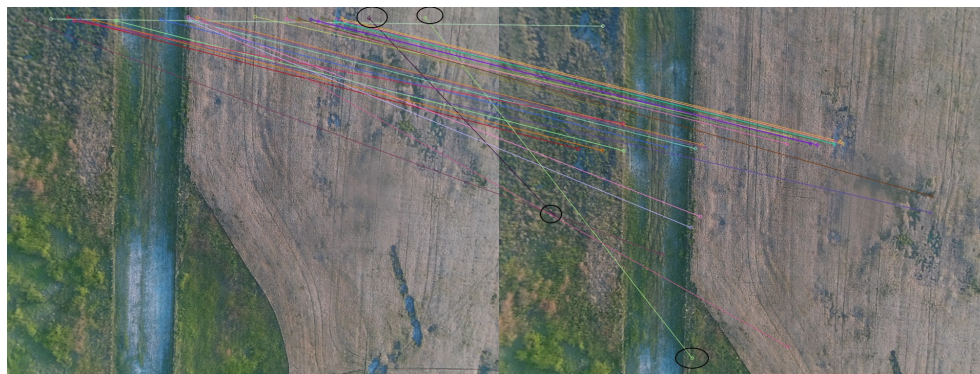


Figura 3.13: Pares falsos.

- Teniendo en cuenta que entre una imagen y la consecuente solo va a haber un desplazamiento en el eje y , si su solapamiento es vertical, o solo va a haber un desplazamiento en el eje x , si su solapamiento es horizontal, se podría decir que cualquier par que no respete esta regla, es falso. Para esto hay que tener en cuenta cierta tolerancia, ya que el comportamiento descrito es ideal. Hay varios factores que pueden afectar la forma en que actúe el dron logrando que el solapamiento entre imágenes varíe levemente. También se sabe que el desplazamiento que debe suceder en el eje y o x , va a depender del porcentaje en el que las imágenes coincidan, es decir, si coinciden un 70 % la traslación va a ser de un 30 % por lo cual se pueden eliminar los emparejamientos que superen ese porcentaje [Figura 3.14].

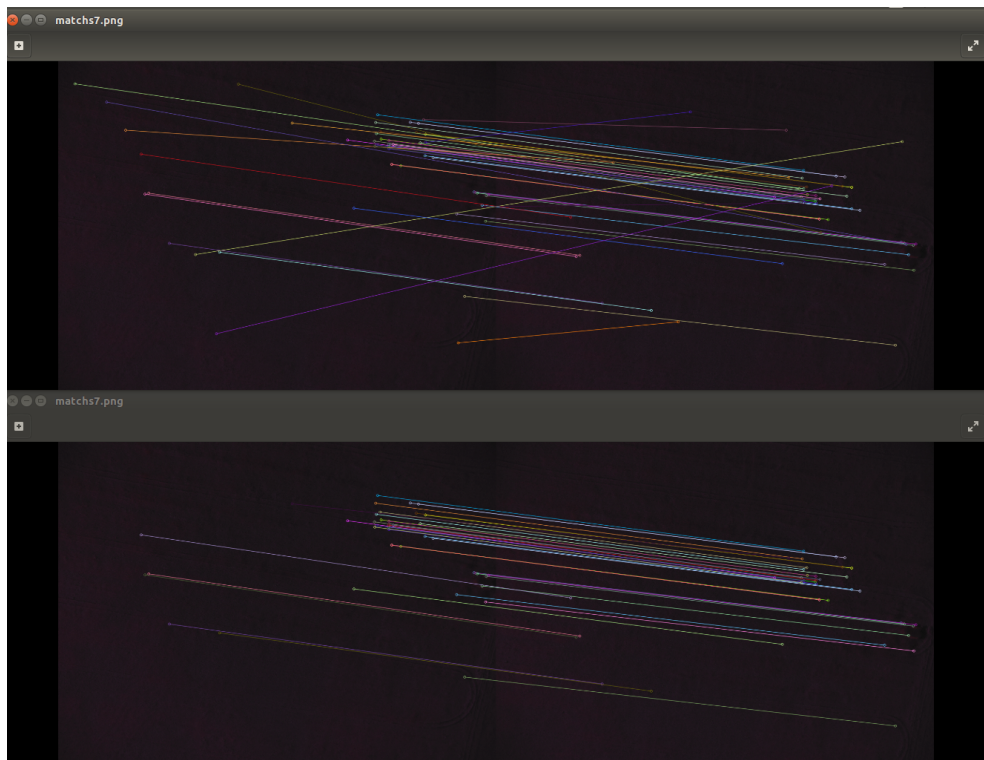


Figura 3.14: Pares de puntos claves sin aplicar primer criterio (arriba), pares de puntos aplicándolo (abajo).

- El problema del criterio anterior, es que hay parámetros que tienen que ser definidos empíricamente, por lo cual, se trató de lograr los mismos resultados, o mejores, pero de una manera más automatizada y exacta. Viendo los emparejamientos que se obtienen entre cada par de imágenes, se pudo concluir que existe una tendencia a que la mayoría de los emparejamientos sigan el comportamiento descrito en el criterio anterior, y solo existen algunos que no lo cumplen, pero que afectan mucho a la transformación. Por lo cual se decidió abarcar el problema por medio de herramientas estadísticas. Primero se calcularon las distancias euclídeas entre las ubicaciones de los puntos claves y la de los emparejados. Debido a que hay una tendencia a que el desplazamiento en x e y entre cada par sea similar, se calcula la media y varianza de la distancia entre todos los pares. Estas son utilizadas para establecer un umbral el cual va a definir que pares van a ser eliminados [Figura 3.15].

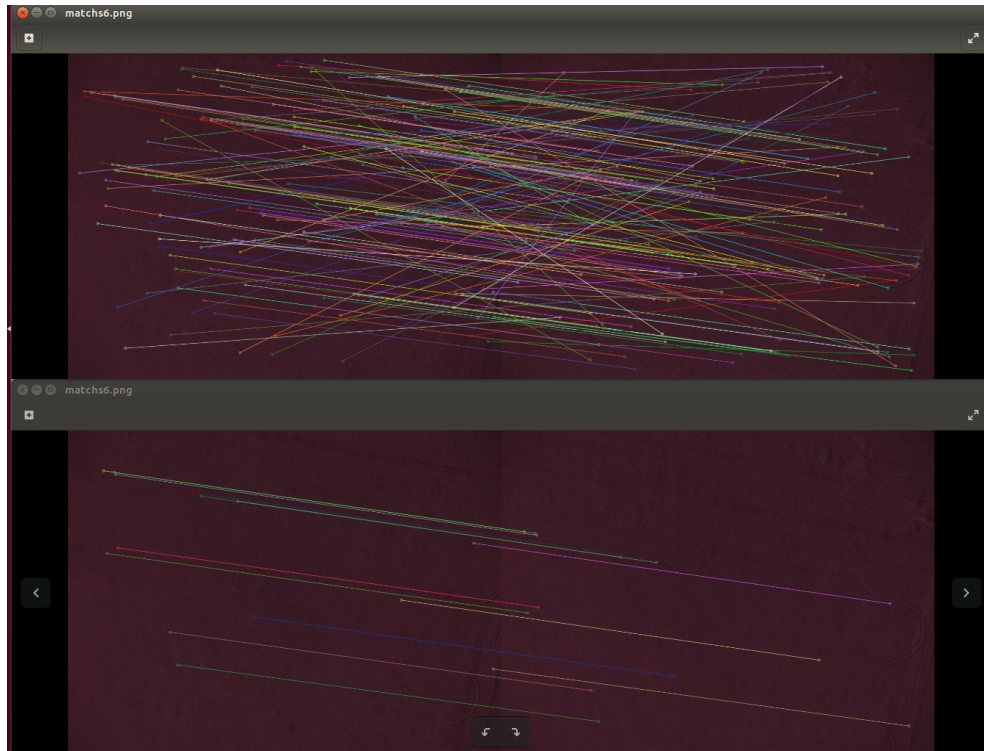


Figura 3.15: Pares de puntos claves sin aplicar segundo criterio (arriba), pares de puntos aplicándolo (abajo).

Una vez filtrados los pares de puntos claves, se aplica alguno de los métodos propuestos en la sección 3.2.3.2 para obtener el subconjunto que va a ser utilizado en el cálculo de los parámetros de la transformación.

3.3.5. Calcular la transformación

Una vez que se tiene el conjunto de pares que se consideren correctos se utilizarán para obtener los parámetros de la transformación. La cantidad de parámetros que se deben calcular, va a depender del tipo de transformación a utilizar.

En este caso práctico, las imágenes son tomadas con una cámara a una altura fija, apuntando perfectamente hacia abajo, desplazándose en una dirección, y eventualmente cambiando la orientación, por lo que sería apropiado utilizar una transformación que solo afecte a la traslación. Sin embargo, al utilizar elementos mecánicos, va a haber un cierto error donde la altura va a verse afectada y la cámara puede no apuntar perfectamente hacia abajo.

Se considero apropiado para este proyecto tanto una homografía como una transformación de semejanza, por lo cual se realizó la generación de un orto-mosaico con ambas transformaciones para tomar una decisión obteniendo los resultados ilustrados en la Figura 3.16. Se puede ver un efecto de punto de fuga en las homografías, el cual puede ser un error introducido por el uso de elementos mecánicos, mientras que en el caso de la transformación de semejanza se observan buenos resultados, con alguna deformación de escala en las últimas imágenes. Con los resultados obtenidos se optó por utilizar esta

última.



(a) Orto-mosaico utilizando transformación proyectiva.

(b) Orto-mosaico utilizando transformación de semejanza.

Figura 3.16: Orto-mosaico con diferentes transformaciones.

Una de las ventajas de utilizar matrices para representar las transformaciones es que se pueden combinar los efectos de estas por medio de la multiplicación matricial, a esto se le llama concatenación de matrices. Para este proyecto, nos permite realizar lo siguiente:

$$\mathbf{T}_{i,k} = \mathbf{T}_{i,j} * \mathbf{T}_{j,k} \quad (3.43)$$

donde $\mathbf{T}_{i,j}$ la transformación de la imagen j con respecto a i y $\mathbf{T}_{j,k}$ la de la k con respecto a j y lo que se obtiene es la transformación de k con respecto a i .

El objetivo es registrar cada imagen en un marco de referencia global, para lo cual se hace uso de la propiedad de concatenación. Gracias a esta, se puede establecer como marco de referencia a la primer imagen, obtener las transformaciones de cada imagen con su consecuente y luego adaptar todas estas al marco establecido de la siguiente manera:

$$\mathbf{T}'_{0,i} = \mathbf{T}'_{0,i-1} * \mathbf{T}(i-1, i) \quad (3.44)$$

con $i = 1, 2, 3 \dots n$ donde n es la cantidad de imágenes y \mathbf{T}' la transformada adaptada al marco de referencia.

3.3.6. Evaluar pegado

Una vez que se tiene la transformación de una imagen con respecto a otra, se necesita una manera de medir que tan precisa es, para así decidir si es aceptable o se requiere calcular otra transformación utilizando más pares de puntos claves. Para lograr esto, se propone definir una manera de calcular un error con el que se pueda comparar transformaciones, y así elegir la que sea mejor. Esto se podría utilizar como herramienta para definir que pares de puntos claves se van a utilizar, es decir, se pueden obtener múltiples transformaciones, con diferentes emparejamientos, evaluar que transformación es la mejor y en base a esto definir el conjunto de correspondencias que dio el mejor resultado.

Se idearon dos maneras de evaluar la transformación. La primera es realizar una comparación píxel a píxel de la zona en que las imágenes se superponen. Sea $I_0(\mathbf{x})$ la imagen sobre la cual se va a pegar la imagen transformada $\tilde{I}_1(\mathbf{x})$ el error se puede definir como:

$$e = \sum_i^n \frac{1}{n} [I_0(\mathbf{x}) - \tilde{I}_1(\mathbf{x})], \quad (3.45)$$

donde n es la cantidad de píxeles superpuestos. La división por n es con el fin de obtener un error medio el cual permita comparar las transformaciones sin importar la superposición que tenga cada una.

Para la segunda manera se propone realizar un pre-procesamiento a las imágenes aplicando filtros para así resaltar bordes, eliminar ruido y tener más tolerancia al error de superposición y luego aplicar la métrica definida en la Ecuación 3.45. Esto se puede lograr suavizando las imágenes con difusión gaussiana, y utilizando algún detector de bordes. Lo que se quiere lograr es realizar una comparación más detallada, teniendo en cuenta detalles en las imágenes, en lugar de las intensidades de sus píxeles.

3.3.7. Generar el cuadro delimitador

En geometría, el cuadro delimitador mínimo o más pequeño para un conjunto de puntos (S) en N dimensiones es el cuadro con la medida más pequeña (área, volumen o hiper volumen en dimensiones más altas) dentro del cual se encuentran todos los puntos. Para este caso es una imagen con la menor resolución posible, en la cual se encuentren pegadas todas las imágenes.

Debido a que las transformaciones tienen rotaciones, escalados y traslaciones, se debe encontrar cual va a ser el máximo y mínimo valor en x y en y para que al transformar las imágenes, no se pierda nada de información, es decir, no quede ninguna imagen fuera de la caja de límites.

En procesamiento de imágenes el origen en las coordenadas está ubicado en la parte superior izquierda de la imagen [Figura 3.17]. Por este motivo los valores mínimos y máximos del eje y van a agregar bordes arriba y abajo respectivamente, y los valores mínimos y máximos del eje x van a generar bordes a la izquierda y derecha respectivamente.

Para obtener los máximos y mínimos se tiene que analizar las traslaciones, escalados y rotaciones de cada una de las transformadas, ya que, estas serán las que indiquen la

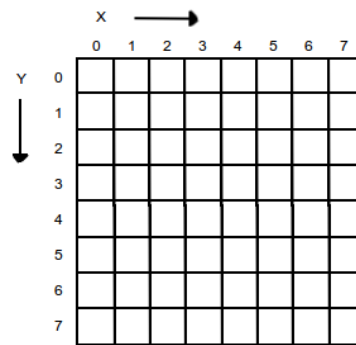


Figura 3.17: Sistema de coordenadas en procesamiento digital de imágenes.

posición de cada uno de los píxeles una vez pegados, pero no va a ser necesario ver píxel a píxel para saber cuales van a ser los extremos, con solo analizar sus esquinas ya es suficiente. Luego de obtener los valores necesarios se copia la primer imagen, que es la cual se toma como marco de referencia principal al cual el resto de las imágenes son transformadas, y se le agregan bordes en base a estos valores. Por último se pegarán todas las imágenes transformadas en el cuadro delimitador. En la Figura 3.18 se ilustra un ejemplo del cuadro delimitador generado para el pegado de 2 imágenes, donde se puede apreciar que las esquinas de las imágenes son las que determinan el tamaño del cuadro.



Figura 3.18: Cuadro delimitador del pegado de 2 imágenes.

3.3.8. Adaptar transformaciones

En pasos anteriores, las imágenes fueron redimensionadas disminuyendo su resolución, en caso de que se quiera que el resultado tenga el tamaño real se deben volver a cargar las imágenes con su tamaño original y adaptar las transformaciones a esa resolución.

Debido a que para este proyecto se utiliza una matriz de semejanza, se puede adaptar la transformada simplemente multiplicando las traslaciones por el factor que se utilizó en un principio para realizar el escalado.

3.3.9. Realizar el pegado

El paso final es combinar todas las imágenes en una figura final. Esto podría simplemente consistir en transformar la imagen y pegar cada uno de sus píxeles sobre el cuadro delimitador, pisando los anteriores. Pero la desventaja es que en algunos casos esto puede llevar a un error conocido como problema de costura, donde en la imagen final se puede notar en que parte se realizó el pegado. Para evitar esto, en lugar de pisar el píxel anterior, se puede realizar alguna suma ponderada de los píxeles.

Hay varios algoritmos para decidir la forma en la que se va a realizar la ponderación, pero se optó por idear uno. Sea B una imagen que va a ser pegada sobre otra imagen A , y C el área en la que ambas imágenes se superponen, es razonable pensar que en las coordenadas correspondientes a C que se encuentren más cercanos al centro de A , los píxeles deben estar más influenciados por las intensidades de esta, y viceversa para los píxeles más cercanos al centro de B . Utilizando este razonamiento, se propuso generar una máscara para B , la cual sea 1 en su centro y disminuya a medida que se acerca a sus bordes [Figura 3.19]. Luego a la hora de decidir el valor que va a tener cierto píxel pueden suceder los siguientes eventos:

- Solo el píxel de la imagen A tiene valor, por lo cual se asigna esa intensidad.
- Solo el píxel de la imagen B tiene valor, por lo cual se asigna esa intensidad.
- Ambas imágenes tienen un píxel con intensidades i_A & i_B , por lo que se busca en la máscara que valor tiene en esa ubicación. Sea el valor α se va a decidir la intensidad final de la siguiente manera:

$$i_C = i_A * (1 - \alpha) + i_B * \alpha \quad (3.46)$$

3.4. Experimentos y discusiones

A lo largo del incremento se presentaron problemas para los cuales no había una solución clara, por lo que se fueron proponiendo e implementando posibles soluciones y, en base a los resultados que brindaban, se agregaron como un paso al proceso para la generación del orto-mosaico. Aunque muchas de las pruebas realizadas no forman parte del proceso final, fueron importantes para decidir que pasos realizar y de que manera y así obtener como conclusión el proceso definido en la sección 3.3

3.4.1. Discusión acerca de malas transformaciones

Uno de los primeros problemas fue que, en algunos casos, las transformaciones generaban deformaciones indeseadas. Lo que generaba ese efecto no estaba totalmente claro

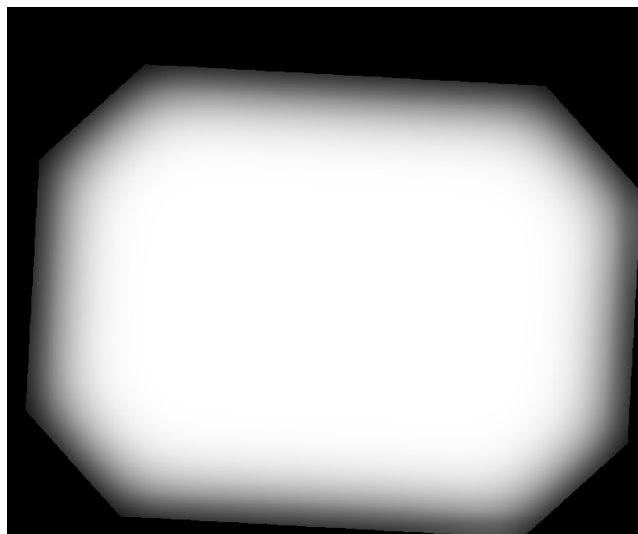


Figura 3.19: Mascara cuyo valor disminuye cuando se aleja del centro de la imagen.

en un principio, por lo que se comenzó analizando los parámetros de las transformaciones. Con este análisis se pudo ver que algunas de las matrices tenían un gran cambio de escala y (en el caso de las homografías) de perspectiva. Se tenía claro el problema pero no el origen y al desconocer esto tampoco se podía abordar una solución, por lo que se realizaron pruebas para lograr una mejora en los resultados. En la Figura 3.20 se ilustra la generación de orto-mosaicos con distintas deformaciones.

Debido a que se sabía que el problema estaba al generar la matriz de transformación, se analizaron todos los pasos previos que podían llegar a afectarlas. Primero se tienen que detectar y describir los puntos claves, por lo que se fueron variando los métodos para realizarlo, pero los cambios en las transformaciones eran pequeños y no se solucionaba el problema. Luego se analizó el emparejamiento de los puntos, pero esto no podía ser la raíz del conflicto debido a que el método que se utiliza, el cual se describió en 3.3.3, es el que brinda las mejores parejas. Por último se realiza un filtrado para obtener los pares que tengan menor distancia, es decir, que sean más parecidos, utilizando sus descriptores y la distancias de hamming. Para ver si el problema se encontraba en este último paso, se probó variar la cantidad de pares que eran seleccionados, y como resultado se vio que algunos casos eran solucionados utilizando un conjunto más grande, y otros con uno más pequeño. Para entender el motivo de esto se dibujaron en las imágenes el conjunto de pares que generaban el problema y los que lo solucionaban y se pudo ver que había algunos emparejamientos que eran falsos [Figura 3.13] y generaban la deformación en la transformación.

El resultado de todo este análisis, y solución al problema, fue el paso desarrollado en 3.3.4.

3.4.2. Discusión acerca de punto de fuga

En el resultado final se veía un efecto de punto de fuga, provocado por un error acumulado en cada transformación que hacía que cada vez la escala de pegado sea más pequeña [Figura 3.21a]. Este problema se presentaba en todos los casos, y se notaba



Figura 3.20: Deformaciones que se apreciaban en algunos pegados.

más cuando el conjunto de imágenes era mayor. Para encontrar el motivo se hicieron las pruebas mencionadas en la sección anterior pero no se halló el origen, por lo que se requirió ampliar el análisis.

Se comenzó modificando la manera en la que se tomaban imágenes, primero se calibró la posición del gimbal del dron para que la dirección de la cámara sea lo más perpendicular posible al objetivo, lo que logró una leve mejora, pero el problema continuaba. En la Figura 3.21b se puede ver la misma deformación que en la Figura 3.21a, pero, al corregir la posición del gimbal, este efecto aparece más tarde.

Analizando el resultado se vio que el pegado comenzaba correctamente pero en un momento se agregaba el efecto de punto de fuga, por lo que se pensó que posiblemente existía una imagen que producía un error que luego se acumulaba y afectaba el resultado final. Para verificar si este era el problema se utilizó un conjunto de N imágenes para realizar $N - 2$ pegados pero para cada realización se quitaba un elemento distinto. Con esto se obtuvieron resultados diferentes, en algunos disminuía esta deformación pero en ninguno desaparecía totalmente.

Siguiendo con la búsqueda del problema se analizaron las transformadas, con lo que se vio que la escala iba disminuyendo de a poco pero, al acumularse, se obtiene este efecto indeseado. Por lo que se propuso calcular varias transformaciones de cada par de imágenes modificando la cantidad de pares utilizados y evaluando los parámetros que determinan

el cambio de escala de cada transformación para luego seleccionar la que menos variación de escala tenga. Esto brindó mejores resultados aunque todavía se tenía una deformación indeseada, pero en este caso era provocado por la perspectiva que agregaba la homografía [Figura 3.21c].

Con todo lo probado y analizado, se llegó a la conclusión desarrollada en la sección 3.3.5, con lo que se eliminaron los efectos indeseados [Figura 3.21d].

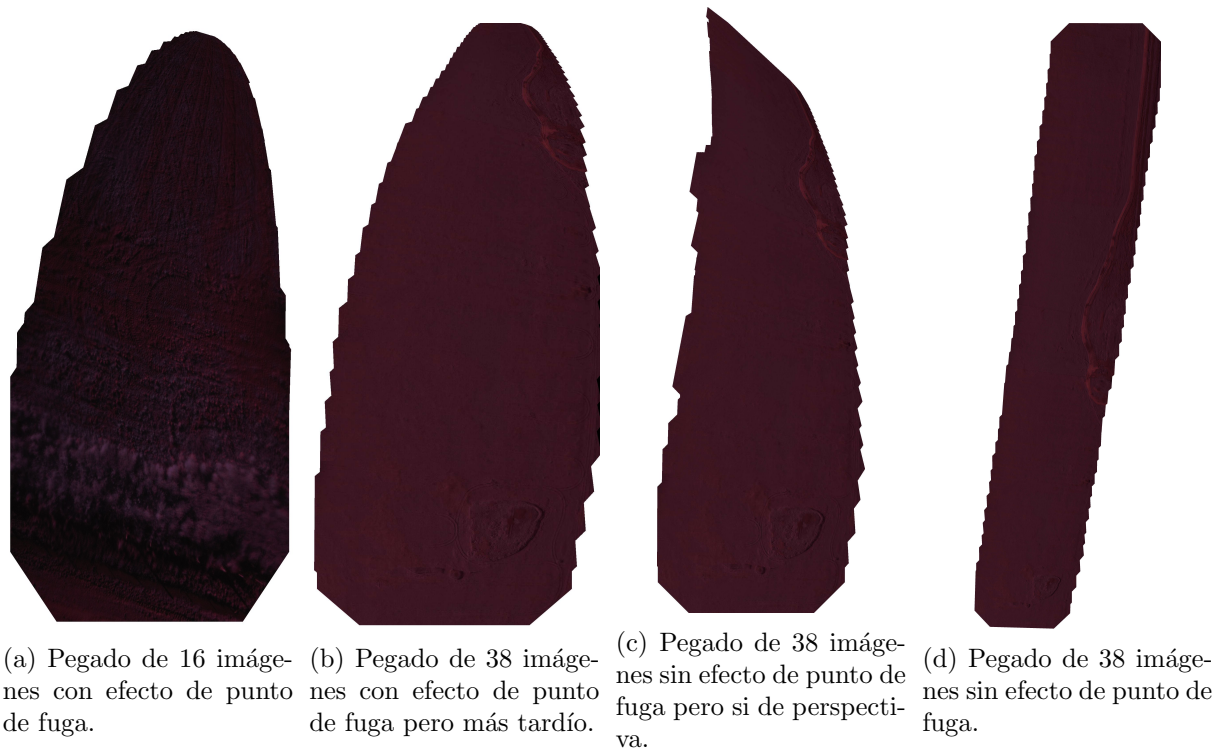


Figura 3.21: Efecto de punto de fuga en orto-mosaicos.

3.4.3. Discusión acerca del problema costura

Cuando el pegado de las imágenes no es totalmente perfecto o existen variaciones de intensidad en las figuras, aparecen algunos saltos de magnitud entre cada figura, a esto se le llama problema de costura. Uno de los factores que influyen en este defecto es la manera en que se fusionen las imágenes.

La forma que se elija para combinar las imágenes es muy importante, ya que, es lo que minimiza el paso de una figura a otra. Se hicieron varias pruebas para lograr definir el método de la sección 3.3.9. Primero se propuso que la intensidad del nuevo píxel iba a depender solo de la nueva imagen que se pegaba, lo cual, en algunos casos, generaba un salto de intensidad indeseado. Para minimizar el salto, se realizó un promedio de los píxeles de las 2 figuras pegadas. Esto tuvo malos resultados, ya que, un pequeño error de pegado hacía que la imagen se viera borrosa. Por último se llegó al método que se definió anteriormente, el cual brindó la solución correcta, logrando que el paso de una imagen a otra sea prácticamente imperceptible. En la Figura 3.22a se ilustra una parte de un orto-mosaico que presenta el problema de costura a la cual se le realiza un acercamiento

donde se puede apreciar el problema, y en la Figura 3.22b se presenta el mismo sector del orto-mosaico pero con el efecto minimizado.

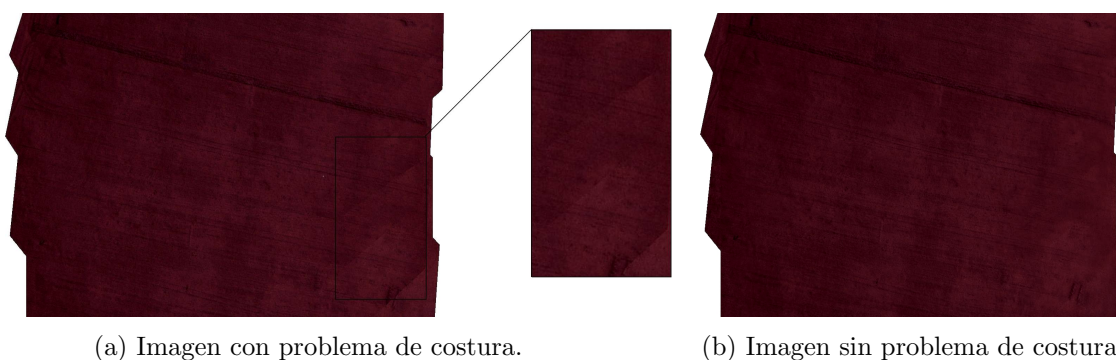


Figura 3.22: Problema de costura.

3.4.4. Discusión acerca del error acumulado

Cuando se pegaban grandes conjuntos de imágenes se iban acumulando errores para cada transformación, lo cual hacía que las últimas imágenes tengan un error. Otro problema era que, cuando el recorrido del dron eran idas y vueltas, las imágenes que se solapaban tanto vertical como horizontalmente, solamente eran comparadas con la imagen anterior, por lo que el solapamiento con otras figuras no era tenido en cuenta.

Para tratar de disminuir el error acumulado, se probó dividir el conjunto de imágenes en varios subconjuntos, realizar el pegado de cada uno de los grupos y por último pegar cada resultado. Para esto se tuvo que decidir de que manera dividir los conjuntos, primero se probó haciéndolo de manera aleatoria, lo cual no daba buenos resultados, ya que, en algunos casos el solapamiento era muy poco en comparación con el área total de la imagen.

El criterio que se utilizó finalmente para conformar los subconjuntos fue el de utilizar filas de imágenes, es decir, que cada conjunto va a estar conformado por todas las imágenes obtenidas con un desplazamiento lineal del dron. Cuando se detecte un cambio de orientación equivalente a 180 grados, se comenzará a pegar el siguiente subconjunto. El orto-mosaico final se obtendrá pegando las filas obtenidas.

3.4.5. Discusión acerca de la captura de las imágenes

Para tomar las imágenes era necesario ir hasta el campo, ese viaje se realizaba una vez a la semana aproximadamente y se permanecía entre 2 y 3 días. El tiempo era utilizado exclusivamente para tomar las imágenes y realizar algún ajuste a la configuración de los vuelos, lo cual dependía de múltiples factores. Por un lado se necesita un viento moderado, ya que se requiere volar a gran altura donde el viento afecta mucho la estabilidad del dron y por lo tanto la obtención de las imágenes. Otro requerimiento es que no haya nubes, puesto que el sol es un factor importante para el tipo de figuras que se están capturando.

Cada vuelo requería mucho tiempo, ya que, entre cada uno de estos se necesitaba aproximadamente 2 horas de carga de batería, y los horarios en los que se recomienda obtener fotografías es entre las 09:00hs y las 12:00hs y las 14:00hs y las 17:00hs.

Para buscar mejorar los resultados, se fue modificando la manera en las que se tomaban las imágenes. Luego de probar diferentes maneras, se verificaban cuales brindaban mejores resultados. Las maneras de vuelo que se probaron fueron las siguientes:

- Realizar un solo transcurso largo.
- Realizar varias idas y vueltas.
- Realizar varias idas y vueltas pero buscando que en cada imagen haya elementos significativos.
- Realizar varias idas y vueltas pero buscando que en cada trayecto haya elementos significativos.

3.4.6. Discusión acerca del tiempo de procesamiento

Debido a que existen algunos cálculos que llevan bastante tiempo se implementó calculo paralelo. Esto no puede ser agregado a todo el proceso, ya que, debe ser utilizado en partes donde no sea importante el orden en el que se realicen los pasos. Los procesos en los que fue implementado son los siguientes:

- El calculo de los puntos claves.
- El emparejamiento de los puntos claves.
- El calculo de las transformaciones.

Existen casos donde no se puede aplicar esto, por ejemplo, en el pegado de la imagen, el valor final de los píxeles en cada realización es utilizado para el pegado siguiente.

Capítulo 4

Cálculo de índices de vegetación

En esta sección se desarrollaran métodos para obtener parámetros que informen sobre el estado del cultivo. El análisis de la vegetación y la detección de los cambios de sus patrones, son claves para la evaluación de recursos naturales y su monitoreo. Es por ello que la detección y la evaluación cuantitativa de la vegetación verde constituyen una de las mejores aplicaciones de la percepción remota para el manejo de los recursos ambientales y la toma de decisiones.

Los parámetros a utilizar son llamados índices de vegetación y son medidas cuantitativas basadas en los valores digitales que tienden a medir la biomasa o vigor vegetal. Usualmente el índice de vegetación es una combinación de las bandas espectrales siendo el resultado de varios valores espectrales que son sumados, divididos o multiplicados en una forma diseñada para producir un simple valor que indique la cantidad o vigor de vegetación dentro de un píxel, permitiéndonos estimar y evaluar el estado de salud de la vegetación en base a la medición de la radiación que las plantas emiten o reflejan.

Valores altos de índices de vegetación identifican píxeles cubiertos por proporciones sustanciales de vegetación saludable. Existe una variedad de índices que han sido desarrollados para ayudar en el monitoreo de la vegetación. La mayoría de estos índices están basados en las interacciones entre la vegetación y la energía electromagnética de las bandas del espectro rojo e infrarrojo.

Para el cálculo de los índices de vegetación es necesario utilizar la información que nos brinda la imagen por medio de los valores de sus píxeles y, además, se considera importante generar datos adicionales de la misma llamados metadatos.

4.1. Información útil para calcular índices

Debido a que los orto-mosaicos se utilizarán para calcular índices que indican la salud de las plantas, la información que se puede considerar útil va a estar basada en los valores que tengan los canales de cada píxel de la imagen. Para el calculo de los índices se requiere separar los canales espectrales que conforman la imagen. OpenCV brinda funciones para realizar esto fácilmente pero, en este caso particular que se utiliza una cámara adaptada, hace falta un paso más para generar los canales que se utilizarán en el cálculo de los índices.

Idealmente la cámara adaptada captura en el canal "Rojo" la longitud de onda correspondiente al rojo y en el canal "Azul" la longitud de onda correspondiente al infrarrojo

cercano sin embargo esto no es exactamente así. En la Figura 4.1 se puede ver las longitudes de onda correspondiente al rojo y al infrarrojo cercano.

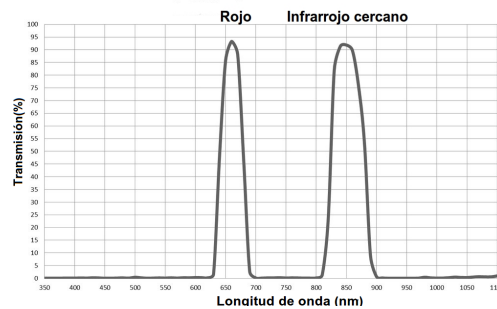


Figura 4.1: Espectros correspondientes al rojo e infrarrojo. Adaptada de [18]

Las cámaras suelen estar compuestas por sensores CCD y filtros que permiten que cada sensor perciba solo un color, pero tienen un defecto en el que, además del color que dejan pasar, también se captura el infrarrojo cercano por lo que se utiliza otro filtro para que este sea omitido. En la cámara adaptada este último filtro es removido y se agrega un filtro para que solo pase la longitud de onda correspondiente al color rojo (y al infrarrojo cercano por su defecto) logrando que en el canal "Rojo" se capture el color rojo y el infrarrojo cercano, y en el canal "Azul" se capture solo el infrarrojo cercano. En la Figura 4.2 se puede ver como la respuesta espectral de los sensores CCD con distinto filtros capturan el infrarrojo cercano.

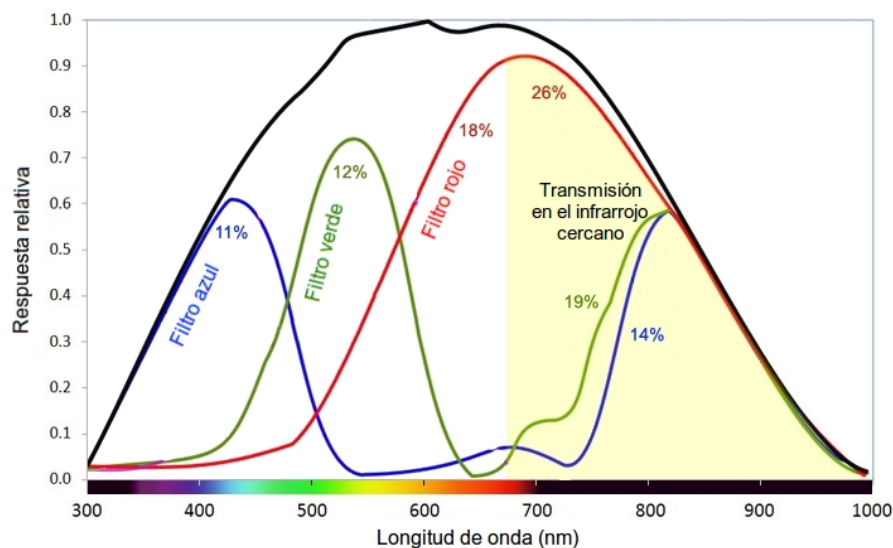
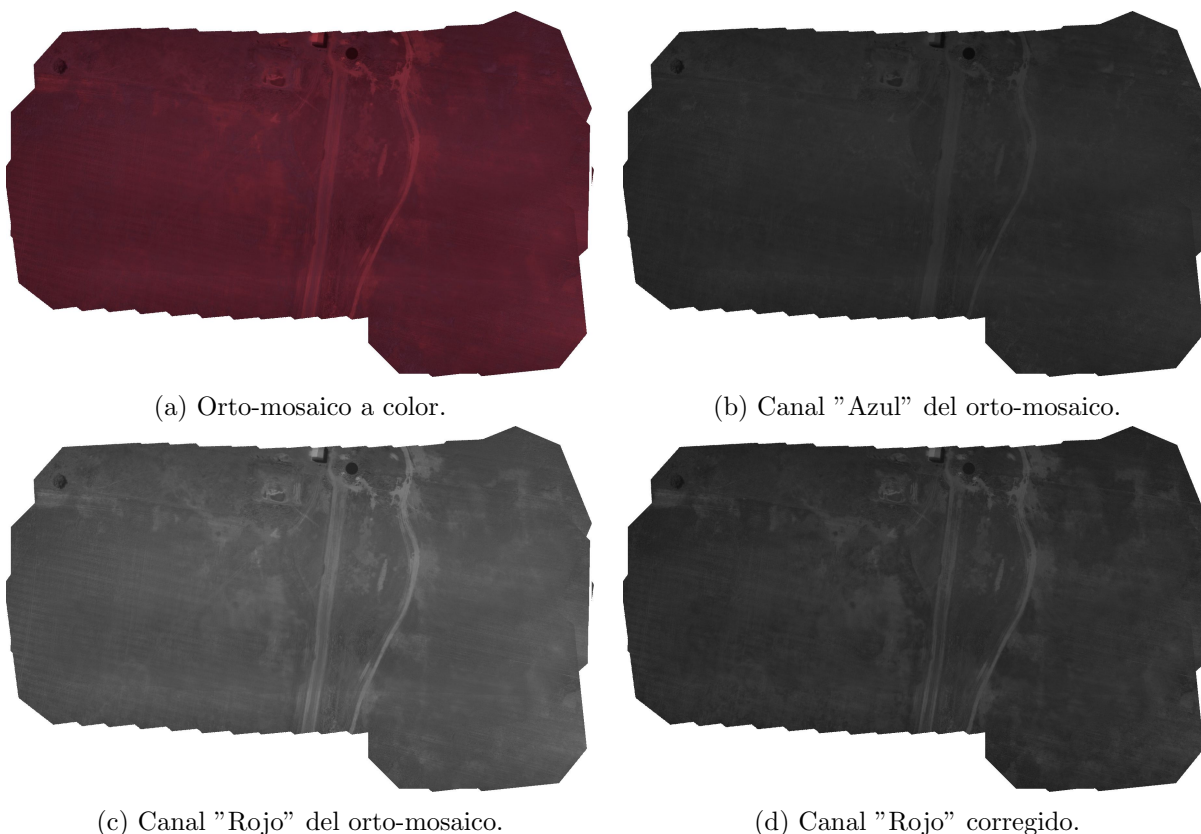


Figura 4.2: Respuesta espectral del sensor CCD. Adaptada de [19]

Teniendo todo esto en cuenta, luego de extraer la información correspondiente a los canales se debe realizar una corrección del canal "Rojo" substrayendole el canal "Azul" para eliminar la influencia del infrarrojo cercano. La Figura 4.10 es un ejemplo de lo

dicho hasta ahora, donde se puede ver un orto-mosaico, sus canales representados en escala de grises y por último la corrección del canal "Rojo" por medio de la substracción del infrarrojo cercano. En la Figura 4.3c se pueden ver altas intensidades a lo largo de toda la imagen, esto es debido a que tiene tanto la influencia del espectro del color rojo como del infrarrojo cercano, pero luego de las correcciones se puede ver como las intensidades están acordes a la realidad [Figura 4.3d].



(a) Orto-mosaico a color.

(b) Canal "Azul" del orto-mosaico.

(c) Canal "Rojo" del orto-mosaico.

(d) Canal "Rojo" corregido.

Figura 4.3: Separación y corrección de canales de un orto-mosaico.

4.2. Extracción de metadatos

Uno de los metadatos a obtener es la dimensión metros por píxel, para así relacionar el tamaño de la imagen con el tamaño real. Para generar esto es necesario conocer una serie de características de la cámara y la altura desde la que se toman las imágenes, datos que deberán ser ingresados por el usuario y almacenados para que puedan ser accedidos al momento de realizar los cálculos.

Para realizar la conversión de píxel a metro² el usuario debe especificar los siguientes datos:

- La longitud focal de la cámara.
- Las dimensiones del sensor de la cámara.
- La altura a la que se realizaron las capturas.

Por medio de los datos ingresados por el usuario se calcula la relación metros sobre píxel y se dibujan sobre el orto-mosaico líneas verticales y horizontales equidistantes cuya distancia representa 50 metros [Figura 4.4]. Esto permite dar una perspectiva diferente de la imagen para así dimensionar que porción de terreno se está observando. De la misma manera se obtienen las hectáreas y se guarda en un archivo relacionado con la imagen para luego utilizarlas.

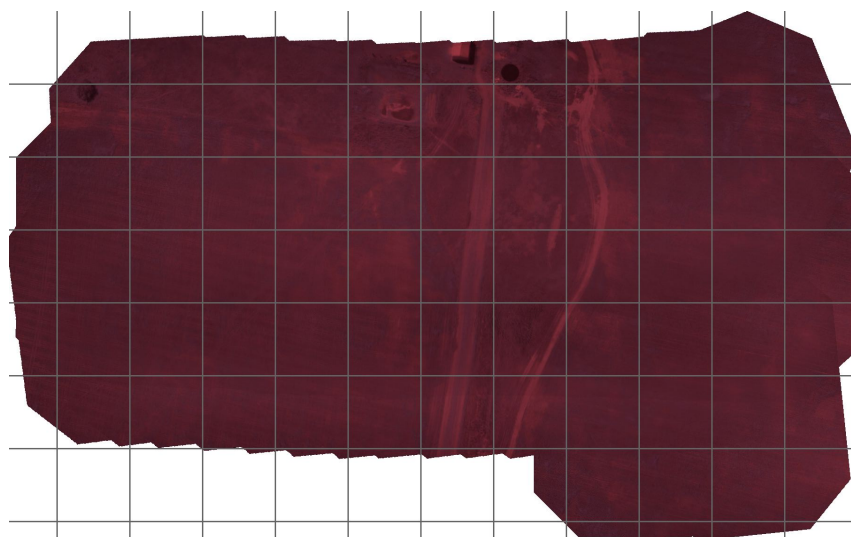


Figura 4.4: Orto-mosaico con líneas verticales y horizontales equidistantes cuya distancia representa 50 metros.

Otro dato de interés que sirve para contextualizar la obtención de la imagen es la fecha. Las cámaras almacenan las imágenes con el siguiente formato:

$$AAAA_MMDD_HHmmSS$$

donde *AAAA* es el año, *MM* el mes, *DD* el día, *HH* la hora, *mm* el minuto y *SS* el segundo de obtención de la foto. Utilizando este formato se puede desarrollar alguna técnica para almacenarlo con un formato más comprensible y luego poder acceder a dicha información cuando sea necesaria.

4.3. Comportamiento espectral de la hoja viva

La detección remota de la cobertura vegetal se fundamenta en algunas propiedades que tienen las hojas al interactuar con la radiación solar. Analizamos a continuación estas propiedades.

La sección transversal de la hoja típica revela sus elementos [Figura 4.5]. La capa más alta, la epidermis superior, está compuesta de células especializadas que encajan estrechamente juntas sin aberturas o huecos entre sí. Esta epidermis superior es cubierta por la cutícula que previene la pérdida de humedad en el interior de la hoja. El lado inferior de la hoja es protegido por la epidermis inferior, similar a la epidermis superior excepto que esta incluye aberturas, llamadas estomas, que permiten el movimiento del aire

en el interior de la hoja. Cada célula estoma es protegida por un par de células guardia que pueden abrirse y cerrarse cuanto fuera necesario para facilitar o prevenir movimientos de aire en el interior de la hoja. La función primaria de los estomas es permitir que ingrese el CO₂ en la hoja por fotosíntesis.

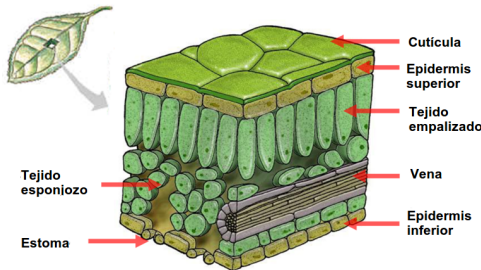


Figura 4.5: Sección transversal de la hoja típica. Adaptada de [20].

Aunque las células guardias y la epidermis aparentan ser pequeñas e ineficientes, ellas son de hecho muy efectivas en la transmisión de gases de un lado de la epidermis al otro. Su rol de permitir que el CO₂ entre en la hoja es esencial para el crecimiento de la planta, pero ellas también juegan un rol crítico en el mantenimiento del balance termal de la hoja permitiendo el movimiento de la humedad hacia el interior de la hoja.

Sin embargo, las células guardia pueden cerrarse para impedir el paso de la humedad y por lo tanto economizar el uso de la misma en la planta. Aparentemente la ubicación del estoma en el lado inferior de la hoja favorece la transmisión máxima de luz hacia la epidermis superior y minimiza la pérdida de humedad cuando la célula estoma está abierta.

En el lado superior de la hoja, justo debajo de la epidermis, está el tejido empalizado que consiste en células verticalmente alargadas ordenadas en paralelo, con el ángulo exacto para la epidermis. Las células palizadas incluyen cloroplastos, células compuestas de clorofila y otros pigmentos activos en la fotosíntesis. Debajo del tejido empalizado se encuentra el tejido esponjoso, que consiste en células irregularmente formadas, separadas por aberturas interconectadas. Este es el lado para el intercambio del oxígeno y el dióxido de carbono para la fotosíntesis y respiración. Aunque la estructura de la hoja no es idéntica para todas las plantas, esta descripción proporciona en resumen general de elementos comunes para la mayoría de plantas, especialmente aquellas que son importantes en los estudios de agronomía y bosques.

La clorofila no absorbe toda la luz del sol uniformemente, las moléculas de clorofila preferentemente absorben la luz roja y azul para usar en la fotosíntesis [Figura 4.6]. Ellas deben absorber tanta cantidad como 70 % a 90 % de la luz incidente en esas regiones. Mucho menos cantidad de la luz verde es absorbida y más es reflejada, entonces el observador humano, que puede ver sólo el espectro visible, observa la reflexión dominante de la luz verde como vegetación viva.

En el espectro cercano al infrarrojo, la reflexión de la hoja es controlada no por pigmentos de plantas, pero sí por la estructura del tejido esponjoso. La cutícula y la epidermis son mayormente transparentes a la radiación infrarroja, entonces una muy pequeña radiación es reflejada de la parte exterior de la hoja. La radiación que pasa a la epidermis superior es fuertemente esparcida por el tejido esponjoso y las cavidades dentro de la hoja.

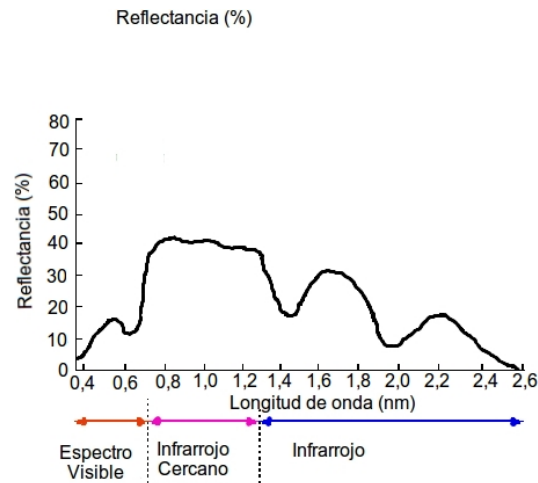


Figura 4.6: Reflectancia de las plantas. Adaptada de [21].

Muy poca de esta energía infrarroja es absorbida internamente, es principalmente (por encima del 60 %) esparcida de manera ascendente (la que se llama energía reflectada) o descendente (energía transmitida). Entonces la estructura interna de la hoja es responsable por el brillo de la reflectancia infrarroja de la vegetación viva.

En el borde del espectro visible la absorción de la luz roja por los pigmentos de clorofila empieza a declinar, y la reflectancia crece abruptamente. Entonces, si la reflectancia es considerada no sólo en el visible, pero a través del visible e infrarrojo cercano, la reflectancia pico de la vegetación viva no está en el verde pero sí en el infrarrojo cercano. Este comportamiento explica la gran utilidad del espectro infrarrojo cercano para los estudios de vegetación y facilita la separación de las superficies de vegetación de las superficies sin vegetación, que son usualmente muy oscuras en el infrarrojo cercano. Además las diferencias en la reflectancia de las especies de plantas frecuentemente son más pronunciadas en el infrarrojo cercano.

Con la madurez o estrés en las plantas por enfermedad, ataques de insectos, o escasez de humedad, las características espectrales de la hoja deben cambiar. En general estos cambios aparentemente ocurren simultáneamente en ambas regiones visible e infrarrojo, pero los cambios de reflectancia en el infrarrojo frecuentemente son más notables. La reflectancia en la región del infrarrojo es aparentemente controlada por la naturaleza de las complejas cavidades entre la hoja y la reflexión interna de radiación infrarroja de esas cavidades.

Algunos científicos sugieren que la tensión de la humedad o madurez natural de la hoja causa esas cavidades para colapsar como plantas marchitas. Otros sostienen que es posible que el decrecimiento en la reflexión de la región cercana al infrarrojo sea causado por el deterioro de células muertas antes que cambios físicos en las cavidades.

Entonces, los cambios en el vigor de la vegetación y las imágenes del infrarrojo han sido valiosos en la detección y mapeo de presencia, distribución, y extensión de los cultivos enfermos e infestaciones de insectos. Además, los cambios en la estructura de la hoja que acompañan la madurez natural de los cultivos están sujetos a detección con imágenes del infrarrojo.

4.4. Índices de vegetación

Los índices de vegetación tienen dos aplicaciones. La primera es utilizarlos como indicadores, mediante comparaciones entre los mismos, para monitorear el crecimiento y la productividad de específicos cultivos, o de fluctuaciones estacionales o anuales en productividad. La segunda es utilizarlos como un dispositivo de mapeo, en tal caso se usan para asistir en la clasificación de imágenes, distinguir áreas con vegetación de aquellas sin vegetación, para distinguir entre diferentes tipos y densidades de vegetación y para monitorear variaciones estacionales en el vigor del vegetativo, abundancia y distribución. Es importante mencionar que la salud de la vegetación es proporcional al valor que tome el índice.

Existen múltiples índices de vegetación que se pueden calcular dependiendo la información disponible. Para este caso se utilizará una cámara RGB modificada para que capture el rojo y el infrarrojo cercano, y una cámara RGB sin modificaciones.

4.4.1. NDVI

El índice de vegetación de diferencia normalizada, también conocido como NDVI por sus siglas en inglés, es un índice usado para estimar la cantidad, calidad y desarrollo de la vegetación con base a la medición, por medio de sensores remotos instalados comúnmente desde una plataforma espacial, de la intensidad de la radiación de ciertas bandas del espectro electromagnético que la vegetación emite o refleja.

Este índice se basa en el peculiar comportamiento radiométrico de la vegetación, relacionado con la actividad fotosintética y la estructura foliar de las plantas, permitiendo determinar la vigorosidad de la planta [7] [Figura 4.7].

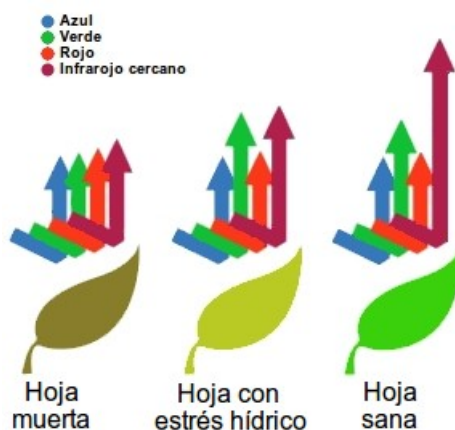


Figura 4.7: Comportamiento de los espectros dependiendo del estado de la hoja. Adaptada de [22].

El cálculo del NDVI implica el uso de una simple fórmula con dos bandas, el Infrarrojo Cercano (NIR) y el rojo (ROJO).

$$NDVI = \frac{NIR - ROJO}{NIR + ROJO} \quad (4.1)$$

Donde NIR es la reflectancia espectral del canal infrarrojo cercano y ROJO representa la reflectancia en el canal rojo del visible. Esta fórmula indica que existe una relación inversa entre el valor de reflectancia de estas bandas, por lo que es posible su uso para discriminación de cubiertas vegetales [3].

Los valores que puede tomar este índice van entre -1 y 1, donde valores mas bajos indican la presencia de tierra o agua y los mas altos indican cantidad de vegetación y salud de la misma.

4.4.2. RVI

Peason Y Miller (1972), proponen el índice RVI (Ratio Vegetation Index), como su nombre indica, es el cociente entre la reflectividad en el infrarrojo cercano y la reflectividad en la banda del rojo, estando este basado en la diferencia espectral en la vegetación en las longitudes de onda del rojo y del infrarrojo cercano [3].

$$RVI = \frac{NIR}{ROJO} \quad (4.2)$$

Los valores del índice mas bajos indican la presencia de tierra o agua y los mas altos indican cantidad de vegetación y salud de la misma.

4.4.3. NGRDI

Las imágenes a color de cámaras digitales pueden ser útiles para determinar tanto la biomasa como el estado nutricional de los cultivos, de modo que se usa el índice de la diferencia verde-rojo normalizada (Normalized Red Green Difference Index, Gitelson et al.,2002).

$$NGRDI = \frac{VERDE - ROJO}{VERDE + ROJO} \quad (4.3)$$

El cálculo del NGRDI implica el uso de una simple fórmula con dos bandas, el verde y el rojo [3]. Los valores que puede tomar este índice van entre -1 y 1.

4.4.4. RG

Con este índice pretendemos excluir la banda del infrarrojo cercano y ver la relación entre las bandas rojo y verde, con el índice de vegetación normalizado NDVI [3].

$$RG = \frac{ROJO}{VERDE} \quad (4.4)$$

4.5. Experimentos

Debido a que el proyecto se desarrolló en un tiempo suficiente como para que se realicen dos cultivos, se pudieron obtener imágenes en una misma parcela de las vegetaciones trigo y soja. Con las imágenes capturadas y el software desarrollado, se generaron sus respectivos orto-mosaicos [Figura 4.8] los cuales serán utilizados para mostrar los resultados obtenidos y poder realizar comparaciones que ayudaran a comprender mejor las conclusiones.



(a) Orto-mosaico generado con imágenes obtenidas del cultivo trigo.

(b) Orto-mosaico generado con imágenes obtenidas del cultivo soja.

Figura 4.8: Orto-mosaicos de los cultivos.

La extensión en el tiempo del proyecto también permitió que se obtengan imágenes en RGB de la soja. Estas se utilizaron para generar el orto-mosaico de la Figura 4.9 y así brindar otra perspectiva para comprender lo que se percibe en las imágenes multi-espectrales, ya que el ojo humano percibe los mismos colores que la cámara con la que se obtienen las imágenes que lo generan.

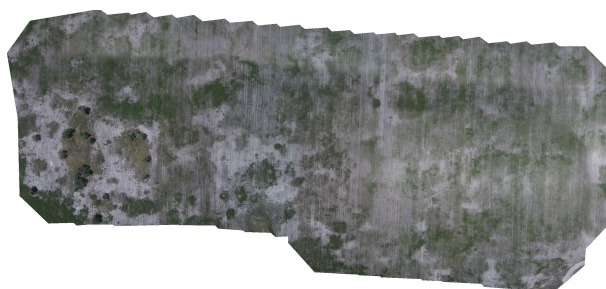


Figura 4.9: Orto-mosaico generado con imágenes RGB obtenidas del cultivo soja.

Con los orto-mosaicos generados, se procedió a calcular los índices correspondientes a cada imagen según los colores que contengan sus canales.

4.5.1. NDVI

Este índice fue calculado con las imágenes multi-espectrales, ya que se requiere que en las imágenes esté presente el color rojo y el infrarrojo cercano. Para representar el NDVI en la imagen se utilizó el color verde en múltiples intensidades donde cada intensidad representa el valor del índice para ese píxel. Los resultados para los cultivos están ilustrados en la Figura 4.10a y la Figura 4.10b.

Cómo se puede ver, el trigo tiene un color uniforme a lo largo de muchas zonas de la imagen y muy pocos sectores con el índice bajo. Por otro lado, la soja presenta muchas zonas desiguales en las que sus intensidades presentan amplias variaciones debido al estrés hídrico que presenta el cultivo.

4.5.2. RVI

Al igual que el NDVI, este índice requiere del color rojo e infrarrojo por lo cual también se calcula con las imágenes multi-espectrales. En Figura 4.10c y Figura 4.10d están ilustrados los índices de ambos cultivos, donde se puede ver que el trigo presenta intensidades más altas y con menos variaciones que el trigo.

4.5.3. RG

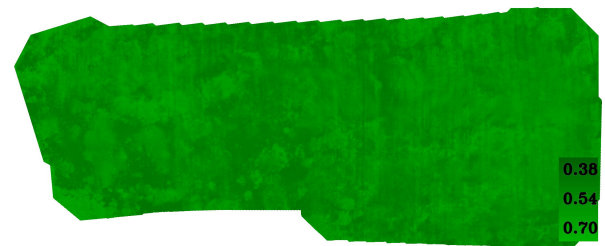
Este índice es utilizado en imágenes RGB ya que requiere tanto el color rojo como el verde. En la Figura 4.10e se puede ver el resultados de calcular el índice. El RG no genera resultados que coincidan con el orto-mosaico RGB ilustrado anteriormente [Figura 4.9].

4.5.4. NGRDI

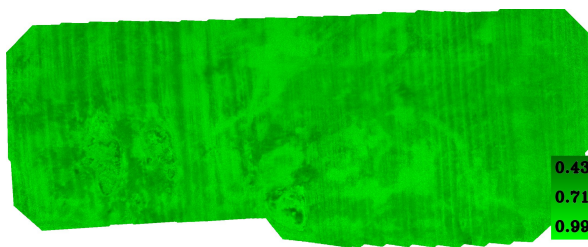
Este índice es utilizado en imágenes RGB ya que requiere tanto el color rojo como el verde. En la Figura 4.10f se puede ver el resultados de calcular el índice. Al igual que el RG, el NGRDI no genera resultados que coincidan con el orto-mosaico.



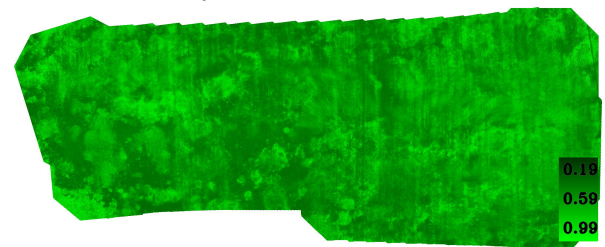
(a) Índice de vegetación NDVI calculado con el orto-mosaico del trigo.



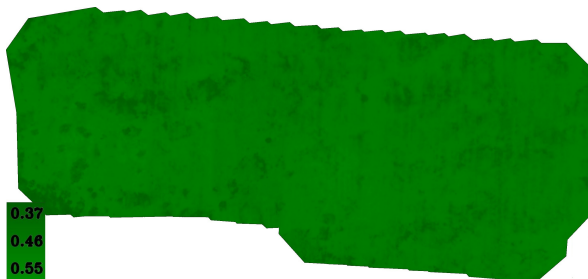
(b) Índice de vegetación NDVI calculado con el orto-mosaico de la soja.



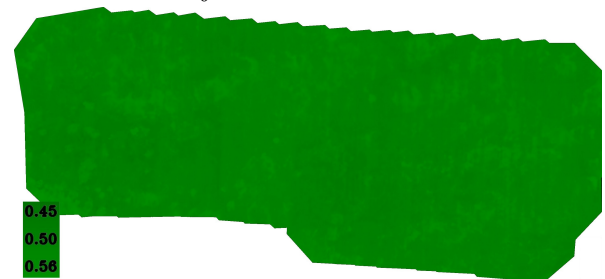
(c) Índice de vegetación RVI calculado con el orto-mosaico del trigo.



(d) Índice de vegetación RVI calculado con el orto-mosaico de la soja.



(e) Índice de vegetación RG calculado con el orto-mosaico RGB de la soja.



(f) Índice de vegetación NGRDI calculado con el orto-mosaico RGB de la soja.

Figura 4.10: Separación y corrección de canales de un orto-mosaico.

4.6. Discusión

Al comparar el orto-mosaico RGB correspondiente a la soja con los índices obtenidos del mismo cultivo, se pudo ver que los índices que utilizan el espectro visible no reflejan la salud de las plantas. Una forma de confirmar esto es viendo que el índice debería tener valores más bajos en las zonas donde hay tierra, sin embargo en RG y NGRDI no es así por lo cual serán descartados ya que no aportan información útil. Por otro lado si se realiza esta misma comparación con las índices que utilizan el rojo y el infrarrojo cercano se puede ver que lo que reflejan los índices NDVI y RVI coinciden con lo que se ve en el orto-mosaico RGB. Esta comparación justifica el uso del infrarrojo cercano para el calculo de los índices.

En cuanto a los índices que utilizan el infrarrojo se pueden obtener múltiples conclusiones al analizar los 2 orto-mosaicos. Por un lado se puede ver que la salud (en el caso del trigo) es bastante homogénea en varias zonas, debido a que en ese cultivo las condiciones climáticas fueron ideales logrando un gran rendimiento. Mientras que para el caso de la soja pasa lo opuesto, el cultivo se enfrentó a un periodo prolongado sin lluvia provocando sequía y por lo tanto estrés hídrico. Esto se puede ver en las zonas con baja intensidad de los índices. Otra conclusión que se puede obtener con estas imágenes, es que hay algunas zonas en las que ambos cultivos presentan los mínimos de sus índices y en esos mínimos la soja no tiene vegetación pero el trigo si, por lo que se puede concluir que la tierra en esa zona es menos resistente a la falta de agua y puede que realizando algún tratamiento para agregar nutrientes esta situación mejore.

4.7. Reportes de desempeño

En esta etapa del proyecto se buscó una manera de representar la información generada para que sea más comprensible el significado de la misma. No existe una única manera de realizar esto y va a depender sobre que datos se quiere hacer foco.

Se decidió implementar diferentes técnicas para lograr un enfoque local y global de la intensidad de los píxeles de los orto-mosaicos que representan los índices.

4.7.1. Enfoque local

La finalidad del enfoque local es encontrar los mínimos y máximos en orto-mosaicos de una misma parcela, ya que estos representan en que lugares el terreno presenta el peor o mejor rendimiento respectivamente. Como se vio en las imágenes que representan los índices, esto no es una tarea fácil si no se realiza algún procesamiento previo, ya que no existe mucho contraste entre los diferentes valores de los índices. Es importante destacar que el termino local esta referido al analisis de una misma zona geográfica.

Todas las técnicas coinciden en que previo a cualquier procesamiento, se necesita realizar una normalización de los píxeles para aumentar el intervalo de intensidades que ocupan los píxeles por lo que los resultados no van a servir para comparar los valores de los índices de orto-mosaicos de diferentes parcelas pero si van a ser útiles para saber en que partes cada parcela presentan sus peores o mejores rendimientos lo cual indica la bondad del terreno para el crecimiento de la vegetación. Otra utilidad es la de evaluar

orto-mosaicos de una misma parcela en diferentes momentos para registrar la evolución de las condiciones de la tierra ante acciones correctivas que hayan sido implementadas.

Las técnicas implementadas para generar diferentes representaciones del índice serán descriptas a continuación.

4.7.1.1. Segmentación y cuantificación del color

La segmentación de imágenes es la tarea de encontrar grupos de píxeles que "vayan juntos". En estadística, este problema se conoce como clustering y es un área ampliamente estudiada con cientos de algoritmos diferentes.

No es de interés para este proyecto reconocer objetos dentro de cada imagen ni delimitar zonas en base a sus formas, por lo que no se utilizarán algoritmos que detecten curvas correspondientes a límites entre objetos.

Para realizar la segmentación se implementó una técnica de compresión con pérdida que consiste en comprimir un rango de valores a un único valor y, de esta forma, cuando el número de símbolos discretos en un flujo dado se reduce, el flujo se vuelve más comprensible. A este procedimiento se le denomina cuantificación del color.

En la Figura 4.11 se aplicaron las cuantificaciones a los índices calculados en la Sección 4.5, asignando a cada píxel dentro de un rango de valores el valor mínimo del rango, y se puede ver como se contrastan más los resultados, permitiendo encontrar los máximos y mínimos. Se encerraron en cuadros negros las zonas donde coinciden los mínimos de los orto-mosaicos de ambos cultivos, estas coincidencias del terreno indican que en esos sectores la capacidad agrícola de la tierra está afectada y necesita de algún tratamiento para mejorar su aptitud. Otra conclusión que se puede obtener es que existe una similitud entre ambos índices (NDVI y RVI).

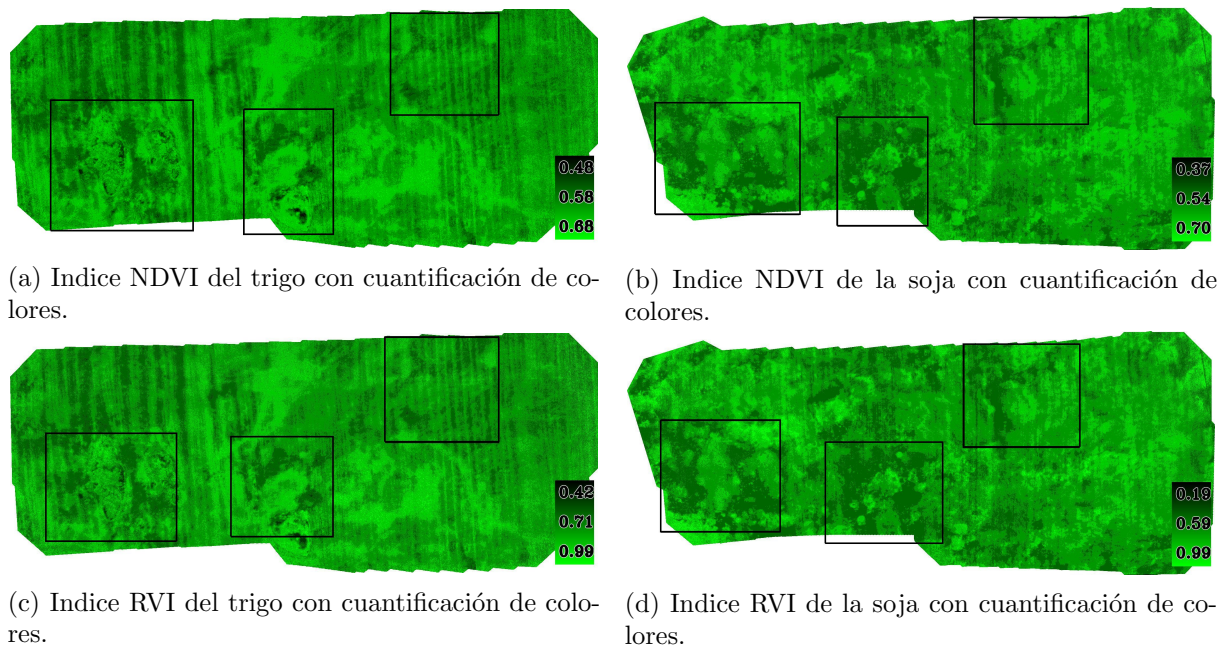


Figura 4.11: Índices con cuantificación de colores.

4.7.1.2. Mapas de colores

La percepción humana no es eficaz para observar cambios finos en las imágenes en escala de un solo color. El ojo humano es más sensible a detectar cambios entre los colores, por lo que a menudo se necesita colorear las imágenes en para obtener una pista sobre ellos. Para lograrlo se aplica un mapa de colores que relaciona cada intensidad de la escala de grises con un color. Para realizar esto se desarrollo una Tabla de búsqueda o LUT (por su traducción al ingles Look Up Table) cuyos colores son generados con variaciones entre el color rojo y el verde [Figura 4.12]. Debido a que previamente se realiza la normalización se clasifico esta técnica como enfoque local.

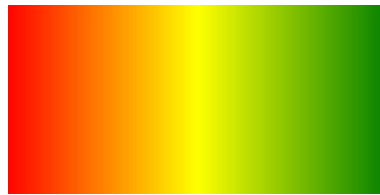


Figura 4.12: Tabla de búsqueda.

En la Figura 4.13 se aplicó el mapa de colores y se generó el índice que representa los valores del LUT. Nuevamente se reafirman las conclusiones obtenidas hasta ahora y se hace énfasis en sus mínimos que coinciden en algunas zonas concluyendo en que esas tierras tienen algún problema que genera peor desempeño.

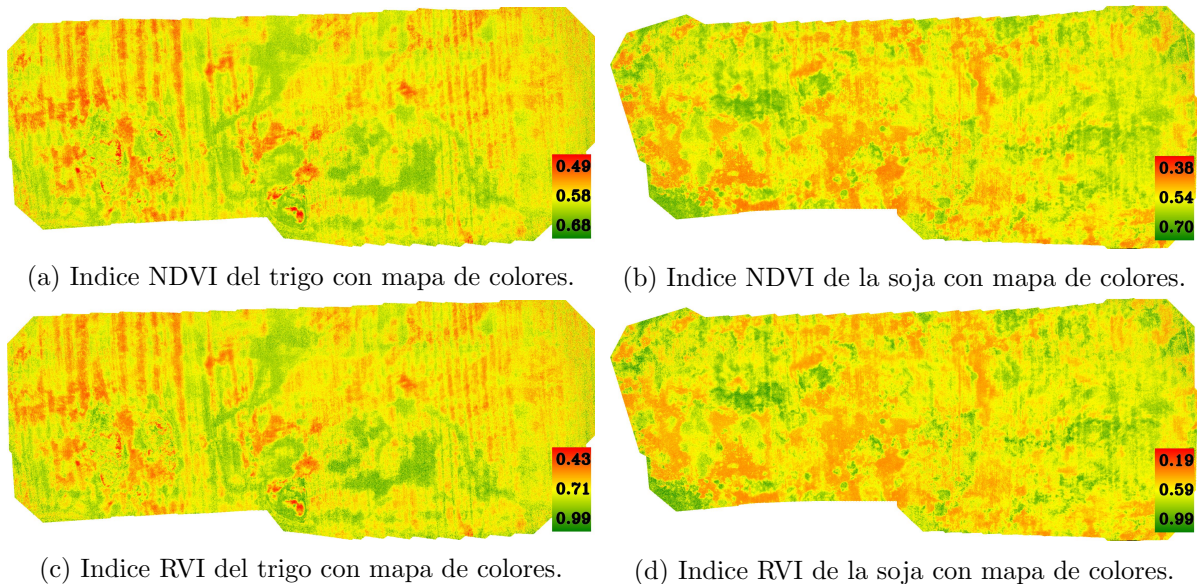


Figura 4.13: Índices con mapa de colores.

4.7.2. Enfoque global

En el enfoque local se buscaba analizar la bondad de la tierra exclusivamente de una parcela para el desarrollo de la vegetación, mientras que para el enfoque global se busca

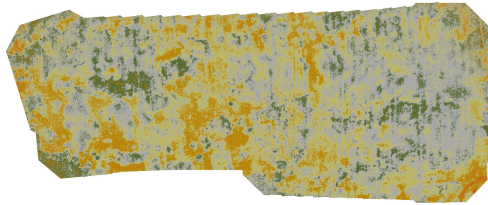
representar los datos de una manera que se puedan realizar comparaciones de la salud de la vegetación de diferentes orto-mosaicos sean de una misma parcela o de parcelas diferentes, debido a la utilización de los datos sin normalizar.

Las conclusiones que se pueden realizar por medio de la observación de los índices están limitadas a la capacidad del ojo humano y del cerebro, por lo que se considera elemental utilizar las herramientas del procesamiento digital para extraer otros datos que ayuden a tener una visión más completa. Para esto se propuso buscar una manera de dimensionar los diferentes valores de los índices. La técnica que se desarrolló con este fin fue la siguiente.

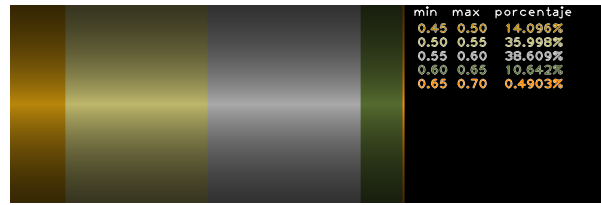
4.7.2.1. Cuantificación global

Esta técnica obtiene los porcentajes de múltiples intervalos de intensidades, luego a cada intervalo se le asigna un color y por último se genera un gráfico que indica cuanto influye cada intervalo en la imagen.

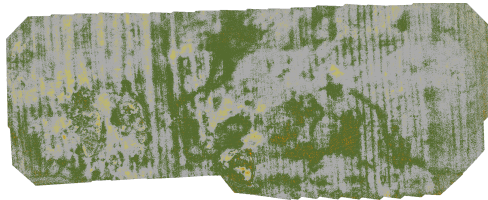
En la Figura 4.14 se le aplicó la cuantificación global a los índices NDVI y RVI de la soja y el trigo obteniendo los orto-mosaicos con la cuantificación de colores y su respectivo gráfico de porcentajes. En ambos índices se puede ver como la distribución de los valores de los intervalos se encuentra concentrada en valores de los índices mas altos para el caso del trigo, indicando que la vegetación se encuentra mas saludable en el mismo.



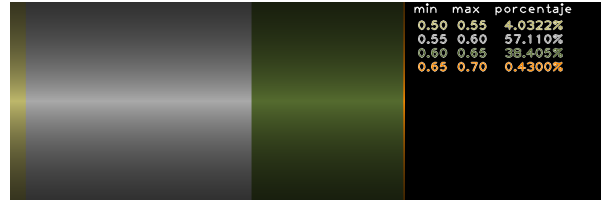
(a) Índice NDVI de la soja con cuantificación global.



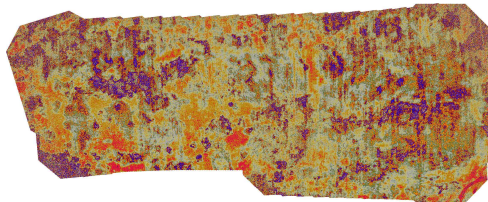
(b) Gráfico de porcentajes del índice NDVI de la soja.



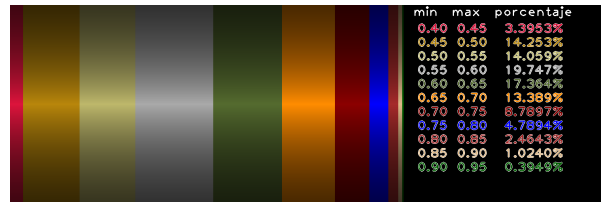
(c) Índice NDVI del trigo con cuantificación global.



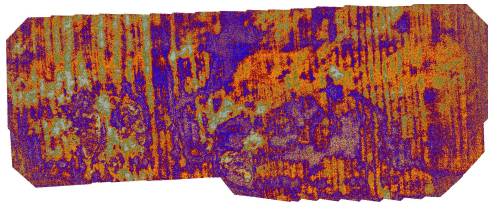
(d) Gráfico de porcentajes del índice NDVI del trigo.



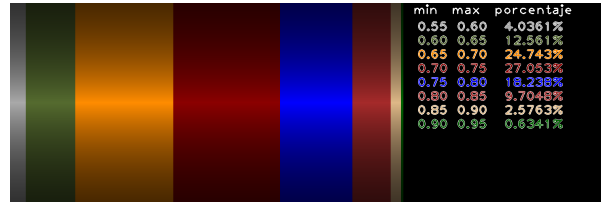
(e) Índice RVI de la soja con cuantificación global.



(f) Gráfico de porcentajes del índice RVI de la soja.



(g) Índice RVI del trigo con cuantificación global.



(h) Gráfico de porcentajes del índice RVI del trigo.

Figura 4.14: Índices con cuantificación global.

Capítulo 5

Redacción de informes

Una vez generada la información útil, calculados los índices y desarrollados los reportes de desempeño se buscó una forma de presentar los resultados en un informe que asista a los profesionales del área para brindar una visión del estado en que se encuentra el cultivo observado. La finalidad de la redacción de informes es que el usuario final no requiera conocer la estructura interna que gestiona el software, sino que simplemente ingrese algunos parámetros necesarios para el procesamiento y obtenga como resultado final este informe.

Para que la confección del informe sea automática, se debió utilizar una librería que permita la generación de documentos portátiles (PDF) por medio del lenguaje de programación con el que se desarrolla el software (C++). Luego de una amplia búsqueda se determinó que esta tarea podía ser realizada por medio de "libHaru", una biblioteca libre, multiplataforma y de código abierto para generar archivos PDF. Es compatible con las siguientes características:

- Generación archivos PDF con líneas, texto, imágenes.
- Esquema, anotación de texto, anotación de enlace.
- Comprimir documento con deflate-decode.
- Incrustar imágenes PNG, Jpeg.
- Incrustar fuente Type1 y fuente TrueType.
- Creando archivos PDF encriptados.
- Uso de varios juegos de caracteres (ISO8859-1 16, MSCP1250 8, KOI8-R).
- Admite fuentes y codificaciones CJK. Puede agregar la función de creación de PDF utilizando HARU sin comprender la estructura interna complicada de PDF. libHaru está escrito en ANSI C, por lo que teóricamente es compatible con la mayoría de los sistemas operativos modernos.

por lo que se ajusta a los requerimientos del proyecto.

5.1. Estructura del informe

Para desarrollar la generación de informes, antes fue necesario definir la estructura pretendida para el mismo, debiendo determinarse de que manera ilustrar los siguientes resultados:

- Orto-mosaicos
- Metadatos
- Indices
- Reportes de desempeño

por cada orto-mosaico y sus metadatos, habrá más de un índice de vegetación, y cada índice de vegetación tendrá asociado más de un reporte de desempeño. Esto permitió presentar la información con la siguiente estructura de jerarquía:

- Portada
- Orto-mosaico y metadatos
 - Índice 1
 - Reporte de desempeño 1
 - ...
 - Reporte de desempeño n
 -
 - Índice n
 - Reporte de desempeño 1
 - ...
 - Reporte de desempeño n

para cada una de estas secciones se debe definir una estructura interna.

5.1.1. Estructura portada

La portada debe incluir datos del autor del informe, así como el título y la fecha de elaboración, por lo que se ilustrará una imagen representativa del software, un título cuyo contenido sea "Informe periódico del cultivo" y la fecha de generación del informe [Figura 5.1].



Informe periódico del cultivo

Fecha de generación del informe: 23/04/2018

Figura 5.1: Ejemplo de portada.

5.1.2. Plantilla de página

Todas las páginas del informe, excepto la portada, van a tener una plantilla que permita contextualizar a que informe pertenece y a que parte de este, por medio de un encabezado y pie de página.

Para delimitar el fin del encabezado y el inicio del pie de página, se dibuja en el documento una línea superior e inferior que los separan del cuerpo.

En el encabezado se mencionará el identificador del orto-mosaico sobre el que se desarrolla el informe y, en el caso de que en esa página se muestren datos sobre algún índice, se referenciará el mismo [Figura 5.2].

Ortomosaico 2017_1019_16_tamano8

Índice ndvi

Figura 5.2: Ejemplo de encabezado de página.

En el pie de página habrá una imagen ilustrativa del software, el número de página y el texto "Creado con UAVAgroState" y debajo de este la fecha de generación del informe [Figura 5.3].

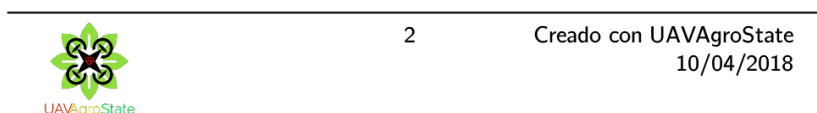


Figura 5.3: Ejemplo de pie de página.

5.1.3. Estructura de las secciones del cuerpo del informe

Cada sección del cuerpo del informe va a presentar diferentes resultados, pero van a seguir una estructura general:

- **Título** de la sección.
- **Información** sobre la(s) imagen(es) que se ilustrará(n).
- **Imagen(es)**.

La Figura 5.4 es un ejemplo de como está estructurada una página de una sección, esto es solamente ilustrativo, ya que en una sección puede haber más información o más imágenes.

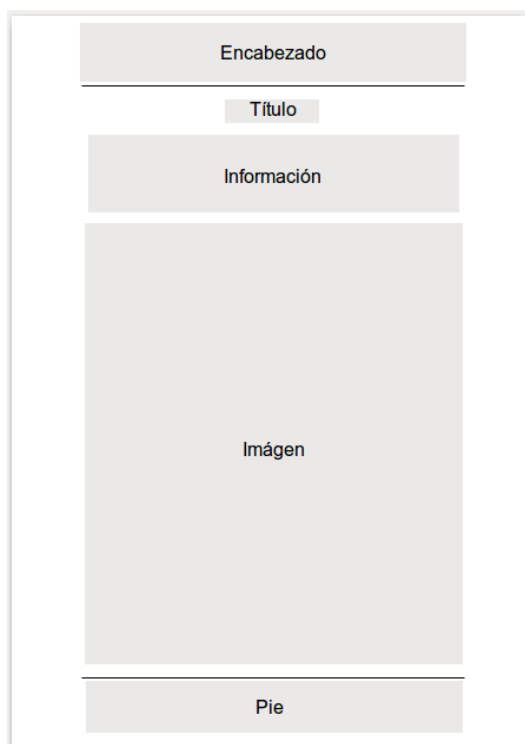


Figura 5.4: Estructura de las secciones del cuerpo del informe.

5.2. Contenido del cuerpo del informe

Una vez definido como va a estar estructurado el informe, se debió decidir que va a contener cada sección del cuerpo del mismo. Esto es decidir que valores van a tener las variables antes definidas como **Título**, **Información** e **Imagen(es)**.

5.2.1. Orto-mosaico y metadatos

Esta primer sección va a encontrarse luego de la portada y va a servir para mostrar el orto-mosaico sobre el cual se calcularon los índices y reportes de desempeño.

El **título** estará conformado por el texto "Orto-mosaico " seguido del nombre del orto-mosaico, por ejemplo "Orto-mosaico 2017_1019_16_tamaño8".

Se consideró importante utilizar esta sección para contextualizar la imagen lo más posible, por lo que en **Información** se decidió ilustrar los metadatos obtenidos en la Sección 4 mediante los siguientes textos separados por ítems:

- El orto-mosaico fue redimensionada a la escala 1 / "escala"
- Las imágenes fueron capturadas a una altura de "altura"
- La dimensión que representa el orto-mosaico son "hectáreas" ha
- Fecha de captura de las imágenes: "fecha"

Por último se muestra la **imagen** del orto-mosaico. Todo esto se ejemplifica en la Figura 5.5.

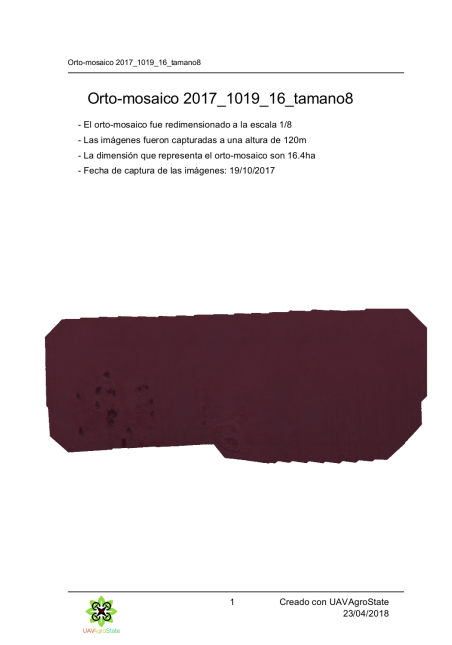


Figura 5.5: Ejemplo de sección de Orto-mosaico.

5.2.2. Índice de vegetación

Esta sección presentará el primer resultado en cuanto al estado de salud de la vegetación y lo hará por medio de un índice de vegetación. Una vez presentada toda la información sobre este índice, este tipo de sección volverá a ser utilizado por otro índice de vegetación, hasta que no haya más información que ilustrar. El **título** estará conformado por el texto "Índice de vegetación " seguido del nombre del índice, por ejemplo "Índice de vegetación ndvi". La **información** estará conformada por un texto explicativo de la imagen para que quien vea el informe pueda comprender lo que se está ilustrando. Por último se muestra la **imagen** del índice de vegetación. Todo lo mencionado se encuentra ejemplificado en la Figura 5.6

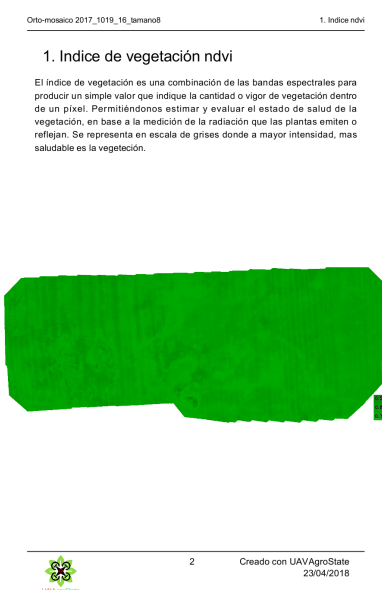


Figura 5.6: Ejemplo de sección de Índice de vegetación.

5.2.3. Cuantificación del color

En esta sección se ilustra una de las técnicas del enfoque local, la segmentación por medio de cuantificación. El **título** de la misma estará conformado por el texto "Cuantificación del color". La **información** estará conformada por un texto explicativo de la imagen para que quien vea el informe pueda comprender lo que se está ilustrando. Por último se muestra la **imagen** del índice de vegetación al cual se le aplicó la cuantificación del color. Todo lo mencionado se encuentra ejemplificado en la Figura 5.7.

5.2.4. Mapa de colores

En esta sección se ilustra otra de las técnicas del enfoque local, la aplicación de un mapa de colores. El **título** estará conformado por el texto "Mapa de colores". La **información** estará conformada por un texto explicativo de la imagen para que quien vea el informe

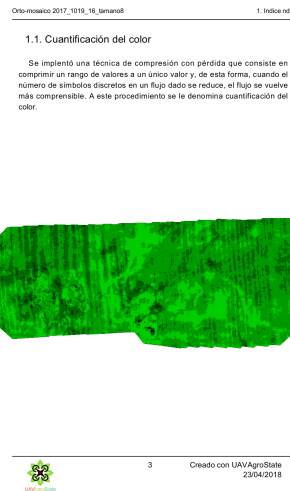


Figura 5.7: Ejemplo de sección Cuantificación del color.

pueda comprender lo que se está ilustrando. Por último se muestra la **imagen** del índice de vegetación al cual se le aplicó el mapa de colores. Todo lo mencionado se encuentra ejemplificado en la Figura 5.8

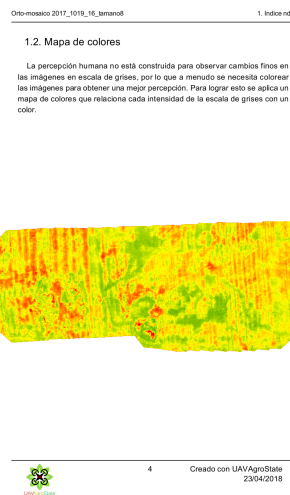


Figura 5.8: Ejemplo de Mapa de colores.

5.2.5. Cuantificación global

Esta sección representa la técnica de enfoque global denominada cuantificación global y va a ser diferente al resto de las secciones, ya que dispone de mayor información. El **título** será "Cuantificación global". La **información** describirá en primer lugar a la imagen a la cual se le aplicó la cuantificación global y luego expresará numéricamente la cantidad

de hectáreas afectadas a cada intervalo de la segunda imagen. Por último se muestra la **imagen** del índice de vegetación al cual se le aplicó el mapa de colores y la que indica los porcentajes en que cada rango de valores está presente en la imagen. Todo lo mencionado se encuentra ejemplificado en la Figura 5.9.



(a) Primer página de la sección Cuantificación global.

(b) Segunda página de la sección Cuantificación global.

Figura 5.9: Ejemplo de sección Cuantificación global.

Capítulo 6

Desarrollo y uso del software

6.1. Elicitación de requerimientos

La elicitación de requerimientos se realizó por medio del estudio de documentación y por la observación directa de las prácticas realizadas habitualmente en el campo, los resultados fueron los siguientes.

6.1.1. Requerimientos funcionales

Los requerimientos funcionales del sistema fueron categorizados en base a los procesos desarrollados en el sistema, se encuentran ilustrados en la Figura 6.1 y son los descriptos a continuación:

- Obtener coeficientes de distorsión:
 - Cargar imágenes: Se cargan en memoria las imágenes contenidas en la carpeta "Imágenes/Calibrar/input". Estas deben ser múltiples fotos de un tablero de ajedrez capturadas con la cámara que se quiere calibrar.
 - Obtener coeficientes de distorsión: Utilizando la técnica descrita en la Sección 3.1.2 y las imágenes del tablero de ajedrez, se obtienen los coeficientes de distorsión.
 - Almacenar coeficientes de distorsión: Se almacenan los coeficientes obtenidos dentro de la carpeta "Datos/Calibrar" para utilizarlo cuando se necesite remover la distorsión.
- Realizar pegado de un conjunto de imágenes:
 - Cargar imágenes: Se cargan en memoria las imágenes contenidas en la carpeta "Imágenes/Pegado/input" con las que se realizará el pegado.
 - Realizar proceso de pegado para cada fila de imágenes: Se realiza el proceso de pegado, descrito anteriormente en la Sección 3.3, para cada subconjunto de imágenes que representen los trayectos del dron.
 - Almacenar resultados intermedios: Se almacenan los resultados en la carpeta "Imágenes/Pegado/output/orto-mosaicos".

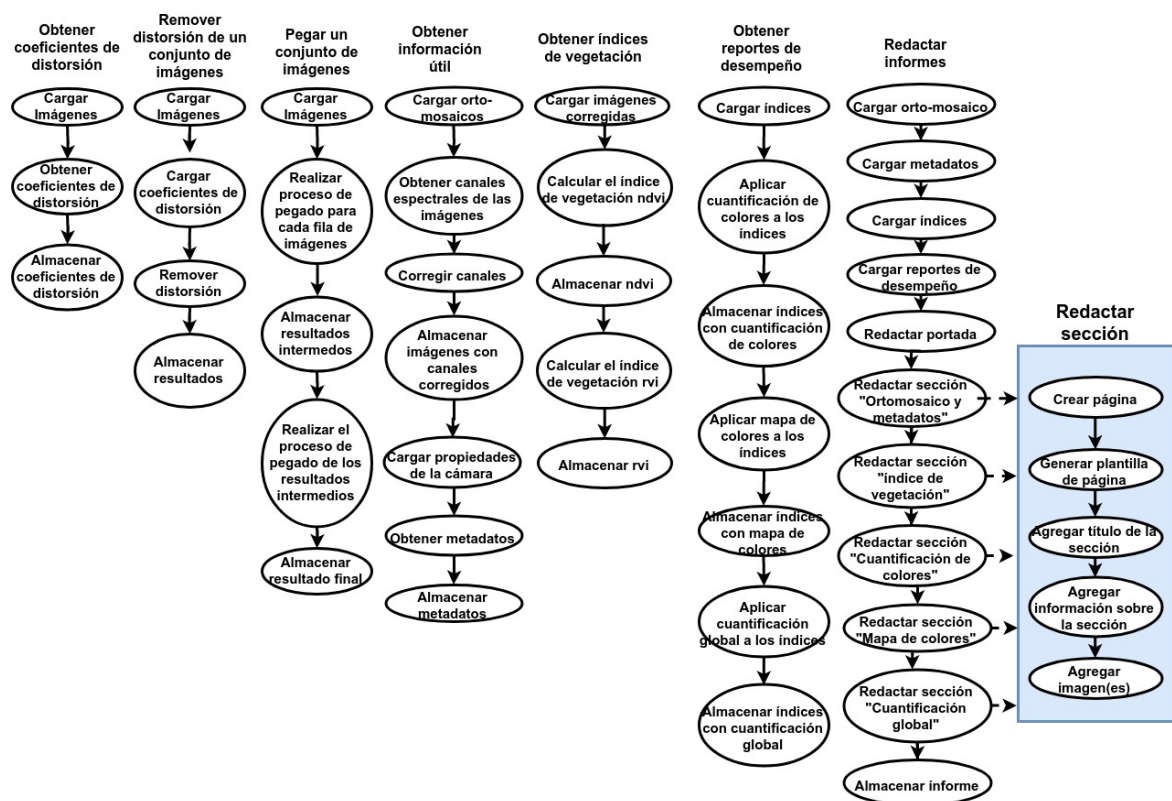


Figura 6.1: Ilustración de los requerimientos funcionales.

- Realizar el proceso de pegado de los resultados intermedios: Se realiza el proceso de pegado de los orto-mosaicos generados anteriormente.
 - Almacenar resultado final: Se almacenan los resultados en la carpeta "Imágenes/Pegado/output/final".
- Remover distorsión de un grupo de imágenes:
 - Cargar imágenes: Se cargan en memoria las imágenes contenidas en la carpeta "Imágenes/Undistort/input" a las que se les removerá la distorsión.
 - Cargar coeficientes de distorsión: Se obtienen los coeficientes almacenados en la carpeta "Datos/Calibrar".
 - Remover distorsión: Utilizando el modelo descrito en la Sección 3.1.2 se remueve la distorsión.
 - Almacenar imágenes sin distorsión: Se almacenan los resultados en la carpeta "Imágenes/Undistort/output".
- Obtener información útil:
 - Cargar imágenes: Se cargan en memoria las imágenes contenidas en la carpeta "Imágenes/Info/input", o se le piden los resultados finales al subsistema "Pegado de imágenes".

- Obtener canales espectrales de las imágenes: Por medio de las funciones brindadas por OpenCv, se obtienen los canales espectrales de las imágenes.
 - Corregir canales: Se realiza el procedimiento descrito en la Sección 4.1 para corregir el canal correspondiente.
 - Almacenar imágenes con canales corregidos: Se almacenan los resultados en la carpeta "Imágenes/Info/output".
 - Cargar propiedades de la cámara: Se cargan los datos de la cámara almacenados en un archivo ,correspondiente a la cámara, en "Data/Camaras" o, en caso de que no existan el archivo, son cargados por el usuario.
 - Obtener metadatos: Se obtienen los metadatos por medio del procedimiento descrito en la Sección 4.2.
 - Almacenar metadatos: Se almacenan los resultados en un archivo, con el mismo nombre que la imagen a la que le corresponden los metadatos, en la carpeta "Data/Imágenes".
- Obtener índices de vegetación:
 - Cargar imágenes: Se cargan en memoria las imágenes contenidas en la carpeta "Imágenes/Indices/input", o se le piden las imágenes con canales corregidos al subsistema "Obtención de información útil".
 - Calcular el índice de vegetación ndvi: Se calcula el ndvi como se describe en la Sección 4.4.1.
 - Almacenar resultados intermedios: Se almacena el resultados en la carpeta "Imágenes/Indices/output/\$nombreImg/ms/ndvi" donde \$nombreImg es el nombre de la imagen sobre la que se calcula el índice.
 - Calcular el índice de vegetación rvi: Se calcula el rvi como se describe en la Sección 4.4.2.
 - Almacenar resultados intermedios: Se almacena el resultados en la carpeta "Imágenes/Indices/output/\$nombreImg/ms/rvi".
 - Obtener reportes de desempeño:
 - Cargar índices: Se cargan en memoria las imágenes contenidas en la carpeta "Imágenes/Desempeño/input", o se le piden los índices al subsistema "Obtención de índices de vegetación".
 - Aplicar cuantificación de colores a los índices: Se realiza el procedimiento descrito en la Sección 4.7.1.1.
 - Almacenar índices con cuantificación de colores: Se almacenan los resultados en la carpeta "Imágenes/Desempeño/\$nombreImg/output" donde \$nombreImg es el nombre de la imagen sobre la que se genera el reporte de desempeño.
 - Aplicar mapa de colores a los índices: Se realiza el procedimiento descrito en la Sección 4.7.1.2.
 - Almacenar índices con mapa de colores: Se almacenan los resultados en la carpeta "Imágenes/Desempeño/\$nombreImg/output".

- Aplicar cuantificación global a los índices: Se realiza el procedimiento descrito en la Sección 4.7.2.1.
- Almacenar índices con cuantificación de global: Se almacenan los resultados en la carpeta "Imágenes/Desempeño/\$nombreImg/output".
- Redactar informes:
 - Cargar orto-mosaico: Se le piden los resultados finales al subsistema "Pegado de imágenes".
 - Cargar metadatos: Se le piden los metadatos al subsistema "Obtención de información útil".
 - Cargar índices: Se le piden los índices al subsistema "Obtención de índices de vegetación".
 - Cargar reportes de desempeño: Se le piden los reportes de desempeño al subsistema "Obtención de reportes de desempeño".
 - Redactar portada: Se realiza lo especificado en la Sección 5.1.1.
 - Redactar sección "Orto-mosaico y metadatos": Se realiza lo especificado en la Sección 5.2.1 por medio del procedimiento "Redactar sección".
 - Redactar sección "Índice de vegetación": Se realiza lo especificado en la Sección 5.2.2 por medio del procedimiento "Redactar sección".
 - Redactar sección "Cuantificación de colores": Se realiza lo especificado en la Sección 5.2.3 por medio del procedimiento "Redactar sección".
 - Redactar sección "Mapa de colores": Se realiza lo especificado en la Sección 5.2.4 por medio del procedimiento "Redactar sección".
 - Redactar sección "Cuantificación global": Se realiza lo especificado en la Sección 5.2.5 por medio del procedimiento "Redactar sección".
 - Redactar sección:
 - Crear página: Se agrega una página nueva al informe.
 - Generar plantilla de página: Se agrega a la página la plantilla descrita en la Sección 5.1.2.
 - Agregar título de la sección: Se redacta el título correspondiente a la sección.
 - Agregar información sobre la sección: Se redacta la información correspondiente a la sección.
 - Agregar imagen(es): Se agrega(n) la(s) imagen(es) correspondientes a la sección.
 - Almacenar informe: Se almacenan los resultados en la carpeta "Data/Informes".

6.1.2. Requerimientos no funcionales

- Producto

- El sistema será desarrollado para las plataformas Windows y Linux.
- La nueva aplicación debe manejar fuentes del alfabeto en Español.
- Usabilidad
 - El sistema debe proporcionar mensajes de error que sean informativos y orientados a usuario final.
 - El sistema debe proporcionar mensajes de ayuda al usuario.
 - El sistema debe detallar constantemente el estado del proceso.
- Eficiencia
 - El sistema debe implementar calculo paralelo para acelerar el procesamiento.
- Seguridad
 - Los datos utilizados no deben estar en riesgo de perderse por errores del sistema.
 - El sistema debe garantizar que los datos que se procesen no serán accedidos desde el exterior.

6.2. Arquitectura del software

Debido a que este software esta compuesto por múltiples subsistemas que se centran en el flujo y transformación de datos, se decidió utilizar el modelo arquitectónico para sistemas de procesamiento de datos. Como su nombre indica, estos sistemas se centran en datos, y las bases de datos con las que se relacionan son normalmente varios órdenes de magnitud más grandes que los propios sistemas. Los sistemas de procesamiento de datos son sistemas de procesamiento por lotes en los que los datos son introducidos y extraídos por lotes a partir de un fichero o base de datos en lugar de ser introducidos y extraídos por un terminal de usuario. Estos sistemas seleccionan datos para el registro de entradas y, dependiendo del valor de los campos en los registros, realizan algunas acciones especificadas en el programa. Pueden volver a escribir el resultado del cálculo en la base de datos y formatear la entrada y la salida calculada. La arquitectura de los sistemas de procesamiento por lotes tiene tres componentes principales. tal y como se ilustra en la Figura 6.2. Un componente de entrada reúne entradas desde una o más fuentes. Un componente de procesamiento realiza cálculos utilizando estas entradas; y un componente de salida genera salidas para ser escritas en la base de datos [23].

La arquitectura que se diseñó para este software esta ilustrada en la Figura 6.3.

El sistema consistirá en una interfaz de linea de comandos (CLI) donde se podrá decidir que subsistema se quiere iniciar, cada uno maneja su propia base de datos por lo que para utilizar datos que no se encuentren en su base van a necesitar obtenerlos de otro subsistema, un ejemplo de esto se ve reflejado en la flecha que vincula el componente *entrada* de *Remoción de distorsión de imágenes con Obtención de coeficientes de distorsión* donde el segundo deberá brindarle los coeficientes de distorsión al primero. También es necesario en algunos casos almacenar datos en la base de datos de otro subsistema, un ejemplo de esto se ve reflejado en la flecha que vincula el componente *salida* de *Pegado*

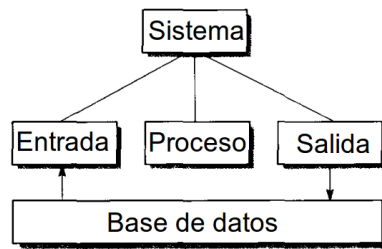


Figura 6.2: Arquitectura de los sistemas de procesamiento por lotes. Adaptada de [23].

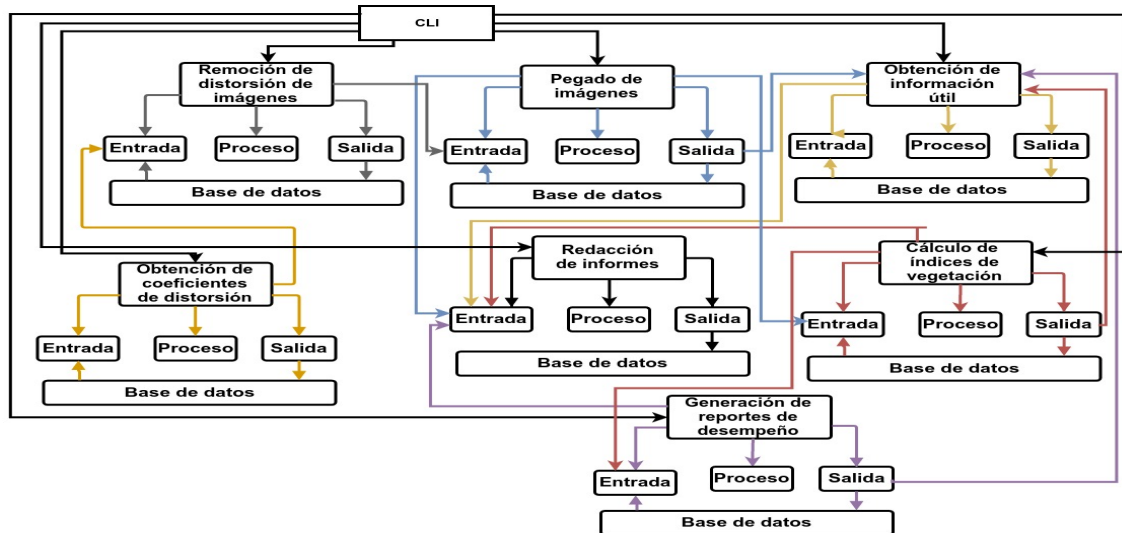


Figura 6.3: Arquitectura del software.

de imágenes con *Obtención de información útil* donde el primero le dirá al segundo que almacene metadatos en su base de datos.

Cada subsistema va a gestionar sus entradas, procesos y salidas de manera diferente:

- **Obtención de coeficientes de distorsión:** Como entrada se cargan de la base de datos las imágenes para calcular los coeficientes, se procesan para obtener los coeficientes de distorsión y estos últimos son almacenados en la base de datos [Figura 6.4].

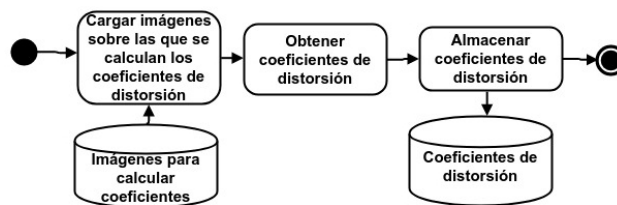


Figura 6.4: Entrada, proceso y salida del subsistema *Obtención de coeficientes de distorsión*.

- **Remoción de distorsión de imágenes:** Como entrada se cargan las imágenes a las que se le quitará la distorsión y los coeficientes de distorsión del subsistema *Obtención de*

coeficientes de distorsión, se realiza el proceso que genera las imágenes sin distorsión y estas últimas son almacenadas en la base de datos [Figura 6.5].

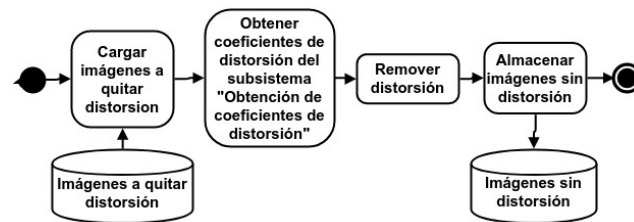


Figura 6.5: Entrada, proceso y salida del subsistema *Remoción de distorsión de imágenes*.

- Pegado de imágenes: Como entrada se cargan las imágenes a pegar, las cuales pueden ser adquiridas por la base de datos local o por medio del subsistema *Remoción de distorsión de imágenes*, se aplica la técnica para generar los orto-mosaicos y estos últimos son almacenados en la base de datos [Figura 6.6].

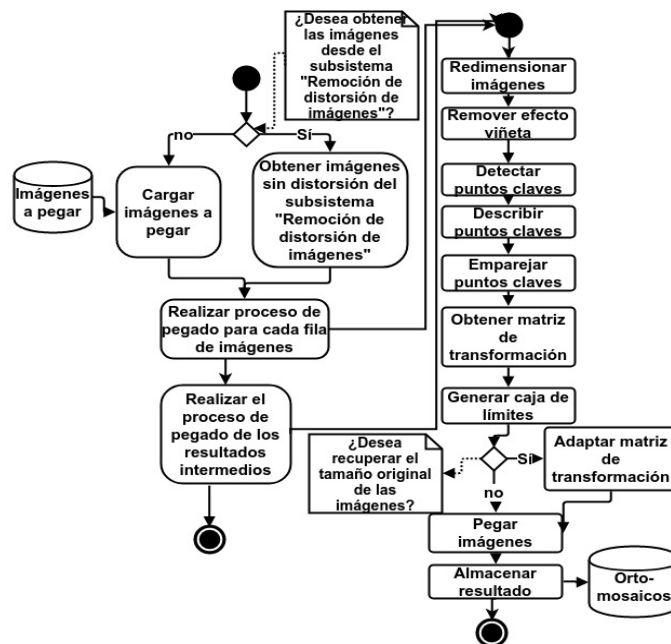


Figura 6.6: Entrada, proceso y salida del subsistema *Pegado de imágenes*.

- Obtención de información útil: Como entrada se cargan los orto-mosaicos sobre los que se extraerán y corregirán los canales espectrales para luego almacenar las imágenes corregidas, luego se cargarán las propiedades de la cámara con la que se capturaron las imágenes que generaron el orto-mosaico o, en caso de que no estén almacenadas en la base de datos, serán ingresadas por el usuario, con estos datos se obtendrán los metadatos deseados y serán almacenados en la base de datos [Figura 6.7].
- Cálculo de índices de vegetación: Como entrada se cargan las imágenes sobre las que se calcularán los índices de vegetación, las cuales pueden ser adquiridas por

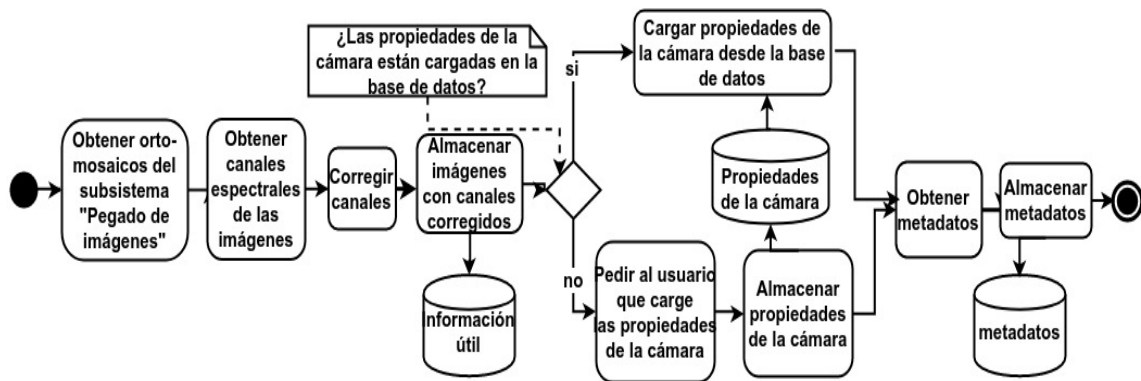


Figura 6.7: Entrada, proceso y salida del subsistema *Obtención de información útil*.

la base de datos local o por medio del subsistema *Obtención de información útil*, luego se calcula el índice de vegetación ndvi por medio de la fórmula presentada en la Sección 4.4.1 y se almacena en la base de datos local, por último se calcula el índice de vegetación rvi por medio de la fórmula presentada en la Sección 4.4.1 y se almacena en la base de datos local [Figura 6.8].

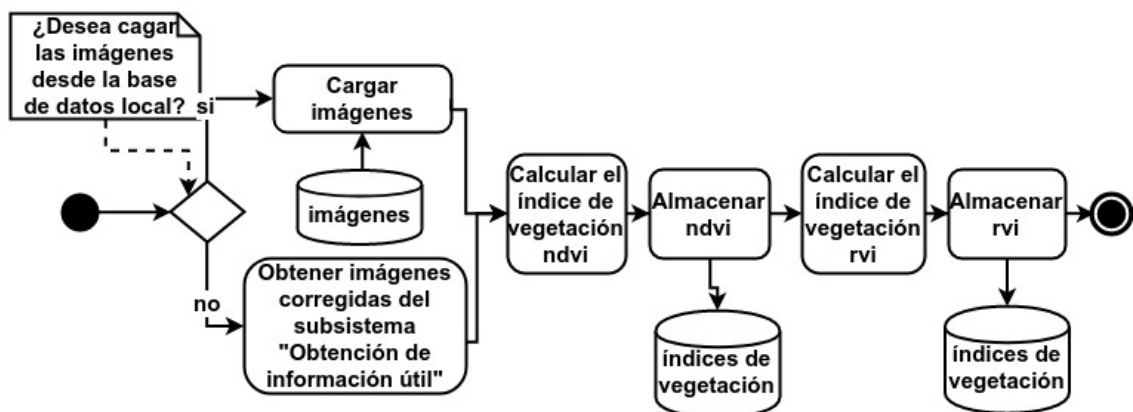


Figura 6.8: Entrada, proceso y salida del subsistema *Cálculo de índices de vegetación*.

- Generación de reportes de desempeño: Como entrada se cargan los índices sobre los que se generarán los reportes de desempeño, los cuales pueden ser adquiridas por la base de datos local o por medio del subsistema *Calculo de índices de vegetación*, luego se aplican las técnicas que generan los reportes y sus resultados son almacenados en la base de datos [Figura 6.9].
- Redacción de informes: Este es el único caso que como entrada no obtiene nada de su base de datos, sino que carga todo lo necesario para realizar el proceso por medio de los otros subsistemas. Como entrada obtiene los orto-mosaicos por medio del subsistema "Pegado de imágenes", los meta-datos por medio del subsistema "Obtención de información útil", los índices de vegetación por medio del subsistema "Cálculo de índices de vegetación", los reportes de desempeño por medio del subsistema "Generación de reportes de desempeño". Luego para cada orto-mosaico redacta un informe y lo almacena en la base de datos local [Figura 6.10].

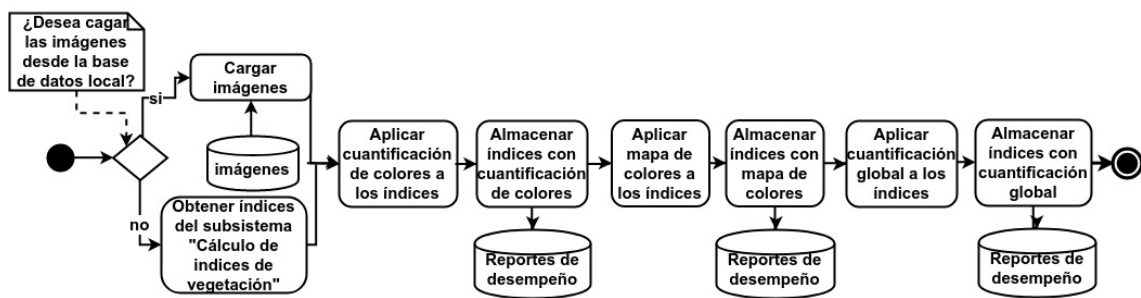


Figura 6.9: Entrada, proceso y salida del subsistema *Generación de reportes de desempeño*.

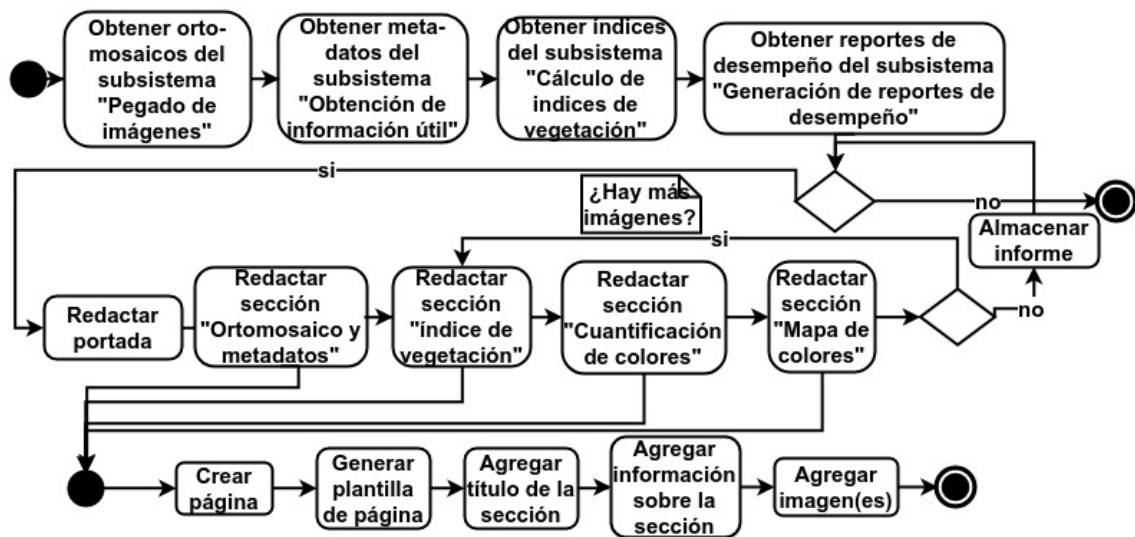


Figura 6.10: Entrada, proceso y salida del subsistema *Redacción de informes*.

6.3. Uso del software

En este capítulo se mostrarán ejemplos de la interacción entre el usuario y el software en cada una de sus funcionalidades. Una vez que se inicializa el software el usuario puede seleccionar una acción de una lista ilustrada en la Figura 6.11, dependiendo del número ingresado por medio del teclado se ejecutará una de las funcionalidades detalladas a continuación.

```

Que deseas hacer?
0: Obtener coeficientes de distorsión
1: Remover distorsión de las imágenes
2: Pegar imágenes
3: Calcular información útil
4: Obtener índices de vegetación
5: Obtener reportes de desempeño
6: Redactar informe
Ingrese la opción:
    
```

Figura 6.11: Lista de acciones que puede realizar el software.

6.3.1. Obtener coeficientes de distorsión

Para obtener los coeficientes de distorsión se aplica la técnica mencionada en 3.1.2, donde se utilizan una serie de fotos de una escena que contenga varias líneas rectas. En este ejemplo se utilizan un conjunto de imágenes de un tablero de ajedrez que son copiadas en la carpeta "Imágenes/Calibrar/input" para que el software pueda cargarlas en memoria [Figura 6.12].

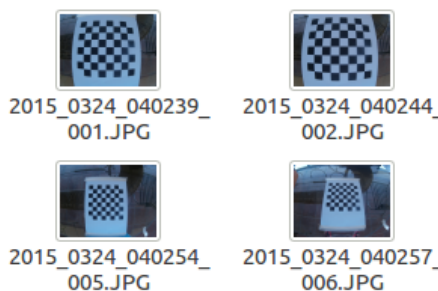


Figura 6.12: Conjunto de imágenes de un tablero de ajedrez.

Seleccionando la opción "0" de la lista de acciones e ingresando la cantidad de esquinas internas horizontales y verticales del tablero y el nombre de la cámara, el cual será utilizado como identificador para almacenar los coeficientes [Figura 6.13], el software comienza el proceso para encontrar una serie de patrones utilizados en la obtención de los coeficientes de distorsión. En la Figura 6.14 se puede ver como el sistema detalla constantemente el estado del proceso y el tiempo que conlleva cada paso del mismo. Se puede notar (por el nombre de la imagen que se está procesando) que el orden en el que se procesan las imágenes es aleatorio, esto se debe a la utilización de cálculo paralelo. Por último los coeficientes obtenidos son almacenados en la carpeta "Datos/Calibrar".

```
Ingrese la opción: 0
- Ha sido seleccionado 'Obtener coeficientes de distorsión'.
Ingrese el numero de esquinas a lo largo del ancho: 7
Ingrese el numero de esquinas a lo largo de lo alto: 7
Ingrese el nombre de la cámara: sjcam
```

Figura 6.13: Interacción del sistema con el usuario para cargar los datos necesarios para obtener los coeficientes de distorsión

Una vez que el usuario ingresa los datos necesarios, el software comienza

```
- Obteniendo la matriz para calibrar
- Buscando patrones en imagen Imagenes/Calibrar/input/2015_0324_040239_001.JPG
- Buscando patrones en imagen Imagenes/Calibrar/input/2015_0324_040305_008.JPG
- Buscando patrones en imagen Imagenes/Calibrar/input/2015_0324_040251_004.JPG
- Buscando patrones en imagen Imagenes/Calibrar/input/2015_0324_040326_012.JPG
-----
- Tiempo en Encontrar patrones para Imagenes/Calibrar/input/2015_0324_040326_012.JPG con éxito: 0.908666 segundos
- Tiempo en Encontrar patrones para Imagenes/Calibrar/input/2015_0324_040302_007.JPG con éxito: 0.9486 segundos
- Tiempo en Encontrar patrones para Imagenes/Calibrar/input/2015_0324_040254_005.JPG con éxito: 0.289901 segundos
- Tiempo en Encontrar patrones para Imagenes/Calibrar/input/2015_0324_040244_002.JPG con éxito: 0.345352 segundos
- Tiempo en Encontrar patrones para Imagenes/Calibrar/input/2015_0324_040248_003.JPG con éxito: 0.357264 segundos
- Tiempo en Terminar de obtener matriz de calibración: 1.6843 segundos
```

Figura 6.14: Detalles del estado de la obtención de los coeficientes de distorsión

6.3.2. Remover distorsión de imágenes

Para remover la distorsión de un conjunto de imágenes se aplica la técnica mencionada en 3.1.2 y los coeficientes obtenidos anteriormente y almacenados en la carpeta "Datos/Calibrar". También es necesario que se copien las imágenes a las que se les removerá la distorsión en la carpeta "Imágenes/Undistort/input".

Seleccionando la opción "1" de la lista de acciones e ingresando el nombre de la cámara [Figura 6.15], para identificar el archivo correspondiente a la misma y así cargar los coeficientes en memoria, el sistema comienza el proceso detallando constantemente el estado del mismo [Figura 6.16] almacenando los resultados en "Imágenes/Undistort/input".

```
Ingrese la opción: 1
- Ha sido seleccionado 'Obtener coeficientes de distorsión'.
Ingrese el nombre de la cámara: sjcam
```

Figura 6.15: Interacción del sistema con el usuario para cargar los datos necesarios para remover la distorsión de las imágenes

```
- Comenzando a quitar la distorsión de las imágenes
- Quitando distorsión a la imagen 2018_0307_134941_029.JPG
- Quitando distorsión a la imagen 2018_0307_135005_035.JPG
- Quitando distorsión a la imagen 2018_0307_134953_032.JPG
- Quitando distorsión a la imagen 2018_0307_135017_038.JPG
- Quitando distorsión a la imagen 2018_0307_134957_033.JPG
- Quitando distorsión a la imagen 2018_0307_135014_037.JPG
- Quitando distorsión a la imagen 2018_0307_134945_030.JPG
- Quitando distorsión a la imagen 2018_0307_135022_039.JPG
- Quitando distorsión a la imagen 2018_0307_134949_031.JPG
- Quitando distorsión a la imagen 2018_0307_135001_034.JPG
- Quitando distorsión a la imagen 2018_0307_135009_036.JPG
- Quitando distorsión a la imagen 2018_0307_135026_040.JPG
- Tiempo en Terminar 2018_0307_134945_030.JPG:0.895536 segundos
- Tiempo en Terminar 2018_0307_134957_033.JPG:0.907669 segundos
- Tiempo en Terminar 2018_0307_135022_039.JPG:0.907646 segundos
- Tiempo en Terminar 2018_0307_135014_037.JPG:0.910618 segundos
- Tiempo en Terminar 2018_0307_134941_029.JPG:0.92083 segundos
- Tiempo en Terminar 2018_0307_134949_031.JPG:0.921185 segundos
- Tiempo en Terminar 2018_0307_134953_032.JPG:0.92535 segundos
- Tiempo en Terminar 2018_0307_135017_038.JPG:0.925365 segundos
- Tiempo en Terminar 2018_0307_135009_036.JPG:0.931063 segundos
- Tiempo en Terminar 2018_0307_135005_035.JPG:0.931705 segundos
- Tiempo en Terminar 2018_0307_135026_040.JPG:0.947974 segundos
- Tiempo en Terminar 2018_0307_135001_034.JPG:1.01418 segundos
- Tiempo en Terminar todo: 1.03108 segundos
```

Figura 6.16: Detalles del estado de la remoción de la distorsión

6.3.3. Pegar imágenes

Para realizar este proceso es necesario copiar las imágenes a pegar en la carpeta "Imágenes/Pegado/input" o, en caso de que se quieran cargar las imágenes a las que previamente se les removió la distorsión, se puede indicar por consola.

Seleccionando la opción "2" de la lista de acciones y respondiendo una secuencia de interrogantes (ilustradas en la Figura 6.17), comienza el proceso de pegado. El sistema carga las imágenes, obtiene sus puntos claves y descriptores y realiza los emparejamientos de los mismos. En la Figura 6.18 se ilustra un ejemplo en el que se procesan 71 imágenes, para simplificar la figura las líneas de puntos suplantadas las líneas de textos que se

repiten para todas las imágenes. Luego por cada fila de imágenes obtiene las matrices de transformación, genera sus cajas de límites y se realiza los pegados. Este procedimiento es ilustrado en la Figura 6.19 y es realizado n veces, donde n es la cantidad de filas de imágenes.

```
Ingrese la opción: 2
- Ha sido seleccionado 'Pegar imágenes'.
Desea cargar las imágenes a las que se le removió la distorsión? 0
A que tamaño desea redimensionar las imágenes? (1/?): 1/8
Quiere recuperar el tamaño original de las imágenes? (0-No o 1-Sí): 0
Nombre de la cámara: mapir
```

Figura 6.17: Interacción del sistema con el usuario para cargar los datos necesarios para pegar las imágenes

```
- Comenzando proceso de pegado
- Cargando Imagenes: (resize: 1/8 Cantidad:71)
  1% -2% -4% -5% -7% -8% -9% -11% -12% -14% -15% -16% -18% -19% -21%
  23% -25% -27% -29% -31% -33% -35% -36% -38% -39% -40% -42% -43% -45% -46% -47% -49% -50% -52% -53% -54%
  56% -57% -59% -60% -61% -63% -64% -66% -67% -69% -70% -71% -73% -74% -76% -77% -78% -80% -81% -83% -84% -85% -87% -88% -90% -91% -92% -94%
  95% -97% -98% -100% -
- Tiempo en cargar las imagenes:21.4444 segundos
- Obteniendo puntos claves y descriptores:
  - Puntos claves imagen35: 5037
  - Puntos claves imagen53: 5023
  - Puntos claves imagen38: 5000
  - Puntos claves imagen37: 5325
  - Puntos claves imagen39: 5279
  .....
- Tiempo en obtener keypoints:7.50487 segundos
- Realizando emparejamientos:
  - Termino emparejamiento 4 con 3008 pares.
  - Termino emparejamiento 12 con 2868 pares.
  - Termino emparejamiento 19 con 2932 pares.
  - Termino emparejamiento 8 con 2907 pares.
  .....
- Tiempo en realizar matching:6.72003 segundos
```

Figura 6.18: Detalles del procesado de 71 imágenes

```
- Generando matrices de transformación:
  - Generando matriz de transformación 0.
  - Generando matriz de transformación 1.
  - Generando matriz de transformación 2.
  - Generando matriz de transformación 3.
  .....
- Tiempo en obtener las matrices: 1.13519 segundos
- Obteniendo bordes de la caja de límites:
  - Espacio abajo: 1645.07
  - Espacio arriba: 0
  - Espacio a la izquierda: 98.7761
  - Espacio a la derecha: 27.4392
- Generando boundingbox y adaptando su matriz de transformación:
- Tiempo en obtener boundingbox y su homografía: 0.01267 segundos
- Realizando pegado: ... (22)
  0% -13% -17% -21% -26% -30% -34% -39% -43% -47% -52% -56% -60%
  65% -69% -73% -78% -82% -86% -91% -95% -100% -
- Tiempo en realizar el pegado: 1.26403 segundos
```

Figura 6.19: Detalles del pegado de una fila de 22 imágenes

Por último vuelve a realizar el proceso de pegado, pero en lugar de utilizar las imágenes de la carpeta "Imagenes/Pegado/input", son utilizadas las filas generadas, logrando obtener el resultado final que va a ser almacenado en "Imagenes/Pegado/output/final". En la Figura 6.20 se puede ver un ejemplo del proceso de pegado de 3 filas de imágenes.

6.3.4. Calcular información útil

Para realizar el calculo de la información útil es necesario haber realizado el pegado de imágenes al menos una vez, ya que utiliza los resultados almacenados por esa funcionalidad, o copiar la(s) imagen(es) en "Imagenes/Info/input".

```

- Comenzando generación de resultado final
- Cargando Imágenes: (resize: 1/1 Cantidad:3)
  33% -66% -100% -
- Tiempo en cargar las imágenes:0.113189 segundos
- Obteniendo puntos claves y descriptores:
  - Puntos claves imagen0: 11646
  - Puntos claves imagen2: 13823
  - Puntos claves imagen1: 13675
- Tiempo en obtener keypoints:1.56838 segundos
- Realizando emparejamientos:
  - Termino emparejamiento 0 con 6978 pares.
  - Termino emparejamiento 1 con 7286 pares.
- Tiempo en realizar matching:4.02857 segundos
- Generando matrices de transformación:
  - Generando matriz de transformación 0.
  - Generando matriz de transformación 1.
- Tiempo en obtener las matrices: 0.190854 segundos
- Obteniendo bordes de la caja de límites:
  - Espacio abajo: 51.3364
  - Espacio arriba: 2099.41
  - Espacio a la izquierda: 101.745
  - Espacio a la derecha: 454.776

- Generando boundingbox y adaptando su matriz de transformación:
- Tiempo en obtener boundingbox y su homografía: 0.037495 segundos
- Realizando pegado: ... (2)
  66% -100% -
- Tiempo en realizar el pegado: 0.389101 segundos
- Tiempo en realizar todo: 62.8075 segundos

```

Figura 6.20: Detalles de la generación del resultado final

Para comenzar con el cálculo de la información útil se debe ingresar la opción 3 de la lista de acciones, luego el sistema requiere que el usuario indique si desea cargar imágenes pegadas por la función anterior y si desea cargar las propiedades de la cámara para que sean almacenadas en la carpeta "Data/Cameras". En el caso de que ya se hayan cargado las propiedades no será necesario ingresarlas. En la Figura 6.21 se ilustra como se ingresan las propiedades de la cámara "mapir".

```

Ingrese la opción: 3
- Ha sido seleccionado 'Calcular información útil'.
Desea cargar las imágenes pegadas por el sistema? (0-No o 1-Si) 1
Desea ingresar las propiedades de la cámara? (0-No o 1-Si) 1
Nombre de la cámara: mapir
Anchura del sensor en mm: 6.174717
Altura del sensor en mm: 4.63104
Longitud focal en mm: 3.97

```

Figura 6.21: Interacción del sistema con el usuario para cargar los datos necesarios para calcular la información útil

Una vez cargadas en memoria las propiedades de la cámara, se realiza el proceso de cálculo de información útil informando al usuario sobre el estado del mismo [Figura 6.22]. La información generada es almacenada en "Imágenes/Info/output".

```

- Calculando información de la imagen 2017_1019_16_tamano8.png
- Tiempo en Terminar 2017_1019_16_tamano8.png:0.06782 segundos
- Calculando información de la imagen 2018_0307_09_tamano8.png
- Tiempo en Terminar 2018_0307_09_tamano8.png:0.082667 segundos
- Calculando información de la imagen 2018_0307_10_tamano8.png
- Tiempo en Terminar 2018_0307_10_tamano8.png:0.072407 segundos

```

Figura 6.22: Detalles del cálculo de la información de las imágenes

6.3.5. Obtener índices de vegetación

Para obtener los índices de vegetación es necesario haber calculado la información útil o copiar la(s) imagen(es) a utilizar en "Imágenes/Indíces/input" para que sean procesadas.

Seleccionando la opción "4" de la lista de acciones e indicando si se desea cargar la información útil calculada por la funcionalidad anterior [Figura 6.23], el sistema comienza a obtener los índices detallando constantemente el estado del proceso [Figura 6.24]. Los índices generados son almacenados en "Imágenes/Indíces/output".

```
Ingrese la opción: 4
- Ha sido seleccionado 'Obtener índices de vegetación'.
Desea cargar la información calculada por el sistema? (0-No o 1-Si) 1
```

Figura 6.23: Interacción del sistema con el usuario para cargar los datos necesarios para la obtención de índices de vegetación

```
- Comenzando calculo de indices
- Comenzando calculo de indices para Imagenes/Pegado/output/final/2017_1019_16_tamano8.png
- Comenzando calculo de indices para Imagenes/Pegado/output/final/2018_0307_09_tamano8.png
- Comenzando calculo de indices para Imagenes/Pegado/output/final/2018_0307_10_tamano8.png
- Comenzando calculo del ndvi para 2018_0307_10_tamano8
- Comenzando calculo del ndvi para 2017_1019_16_tamano8
- Comenzando calculo del ndvi para 2018_0307_09_tamano8
- Comenzando calculo del rvi para 2017_1019_16_tamano8
- Comenzando calculo del rvi para 2018_0307_10_tamano8
- Comenzando calculo del rvi para 2018_0307_09_tamano8
- Tiempo en Terminar 2017_1019_16_tamano8.png:1.55351 segundos
- Tiempo en Terminar 2018_0307_10_tamano8.png:1.72331 segundos
- Tiempo en Terminar 2018_0307_09_tamano8.png:2.40473 segundos
- Tiempo en Terminar todo: 2.4094 segundos
```

Figura 6.24: Detalles de la obtención de índices de vegetación

6.3.6. Obtener reportes de desempeño

Para obtener los reportes de desempeño es necesario haber obtenido los índices de vegetación o copiar la(s) imagen(es) a utilizar en "Imágenes/Desempeño/input" para que sean procesadas.

Seleccionando la opción "5" de la lista de acciones e indicando si desea cargar los índices obtenidos por la funcionalidad anterior [Figura 6.25], el sistema comienza a obtener los reportes de desempeño detallando constantemente el estado del mismo [Figura 6.24]. Los reportes generados son almacenados en "Imágenes/Desempeño/output".

```
Ingrese la opción: 5
- Ha sido seleccionado 'Obtener reportes de desempeño'.
Desea cargar el índice obtenido por el sistema? (0-No o 1-Si) 1
```

Figura 6.25: Interacción del sistema con el usuario para cargar los datos necesarios para la obtención de los reportes de desempeño


```

- Comenzando obtención del reporte de desempeño para la imagen 2017_1019_16_tamano8
- Tiempo en Terminar 2017_1019_16_tamano8:0.213049 segundos
- Comenzando obtención del reporte de desempeño para la imagen 2018_0307_09_tamano8
- Tiempo en Terminar 2018_0307_09_tamano8:0.295402 segundos
- Comenzando obtención del reporte de desempeño para la imagen 2018_0307_10_tamano8
- Tiempo en Terminar 2018_0307_10_tamano8:0.223916 segundos

```

Figura 6.26: Detalles de la obtención de reportes de desempeño

6.3.7. Redactar informes

Toda la información generada es utilizada para redactar el informe por lo que es necesario haber pegado las imágenes y haber obtenido los índices de vegetación y los reportes de desempeño.

Seleccionando la opción "6" de la lista de acciones, el sistema comienza el proceso detallando constantemente el estado del mismo [Figura 6.27]. Los informes generados son almacenados en la carpeta "Data/Informes".

```

- Comenzando proceso de redacción:
- Redactando información de la imagen: 2017_1019_16_tamano8
- - Redactando información del índice: ndvi
- - Redactando información del índice: rvi
- - Escribiendo PDF Data/Informes/2017_1019_16_tamano8.pdf
- Tiempo en Terminar 2017_1019_16_tamano8 :2.06586 segundos
- Redactando información de la imagen: 2018_0307_09_tamano8
- - Redactando información del índice: ndvi
- - Redactando información del índice: rvi
- - Escribiendo PDF Data/Informes/2018_0307_09_tamano8.pdf
- Tiempo en Terminar 2018_0307_09_tamano8 :3.2855 segundos
- Redactando información de la imagen: 2018_0307_10_tamano8
- - Redactando información del índice: ndvi
- - Redactando información del índice: rvi
- - Escribiendo PDF Data/Informes/2018_0307_10_tamano8.pdf
- Tiempo en Terminar 2018_0307_10_tamano8 :2.57113 segundos
- Tiempo en Terminar redacción:7.92154 segundos

```

Figura 6.27: Detalles de la redacción de informes

Capítulo 7

Conclusiones y Trabajos Futuros

En este proyecto se diseñó la experimentación en campo con dron para obtener las imágenes que fueron utilizadas para desarrollar el software que realiza el pegado de las imágenes para generar el orto-mosaico. Con el orto-mosaico generado el software calcula los índices que permiten saber en que estado se encuentra la vegetación de la parcela sobre la cual se voló el dron y genera los reportes de desempeño para representar la información obtenida de una manera más comprensible. Por último el programa redacta un informe que sirve como ayuda para que los profesionales del área tengan una visión del estado en que se encuentra el cultivo observado.

La realización del proyecto permitió corroborar la utilidad de las tecnologías emergentes en conjunto con las herramientas informáticas para obtener una visión mas completa y exacta de un proceso tan complejo como es el desarrollo de la agricultura. Los resultados que brinda el software generado permite tomar decisiones que mejoren el rendimiento del terreno y la productividad de los cultivos sobre los que se realizó el análisis. Por ejemplo, en el período de desarrollo del proyecto se llevaron a cabo 2 ciclos de cultivo completos, es decir siembra, desarrollo y cosecha, en los cuales se pudo comprobar que los resultados obtenidos aplicando el análisis de la vegetación coincidieron con el estado agronómico observado en los cultivos. Se detectaron bajos rendimientos recurrentes en ciertas zonas, por lo que el usuario decidió llevar a cabo un análisis de suelos a los fines de determinar los nutrientes y componentes que se deben aportar para mejorar el rendimiento. La obtención de los diagnósticos por medio del software desarrollado permitió determinar que el bajo rendimiento de la soja no solo fue por el estrés hídrico, sino también por una deficiencia pre-existente en la calidad del suelo, detectado por los bajos rendimientos recurrentes en ambos cultivos.

Es importante mencionar que a medida que se iban obteniendo los informes por medio del software, estos eran constantemente cotejados con las evaluaciones realizadas convencionalmente por el Ingeniero agrónomo a cargo de la explotación. La interacción entre los informes del software y la evaluación del profesional valido que los resultados eran coincidentes.

Para obtener un análisis conciso y una visión mas completa, es necesario aplicar constantemente el software para diagnosticar los cultivos, cotejarlos con los resultados reales al fin de cada cosecha y con esta realimentación aplicar mejoras a los métodos propuestos.

Se tiene planeado como trabajo futuro continuar analizando los cultivos que se realicen y, utilizando la realimentación que brinda el conocimiento del rendimiento real de

los mismos, aplicar correcciones y mejoras en el software. Además se planea agregar un rastreador GPS al dron que permita generar un log de vuelo para luego geotiquetar las imágenes, esto significa agregar información geográfica en los metadatos del archivo de la imagen. Por medio de las coordenadas asociadas a cada imagen se puede hacer una correspondencia entre los píxeles del orto-mosaico generado y el terreno analizado. Además se desea agregar un análisis cuantitativo que brinde cifras de rendimiento en unidades útiles, por ejemplo en quintales por hectárea.

En base a este proyecto se escribió un artículo de congreso el cual fue presentado y aceptado en el 10° congreso de AgroInformática (CAI) de la Jornada Argentina de Informática (JAIIO).

sinc(r) Research Institute for Signals, Systems and Computational Intelligence (sinc.unl.edu.ar)
F. Castiello, C. E. Martínez & E. M. Albornoz, "Software para realizar agricultura de precisión aplicando procesamiento por imágenes captadas por dron (Undergraduate project)"
Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas - Universidad Nacional del Litoral, 2018.

Referencias

- [1] Raúl Yuste Martín. «Teledetección Ambiental de Alta Resolución mediante aplicación de Vehículos Aéreos No Tripulados». En: *Congreso Forestal Español* 6 (2013).
- [2] Spyros Fountas, Marcus Soren y Simon Blackmore. *ICT in Precision Agriculture – diffusion of technology An overview of Precision Agriculture*. 2004.
- [3] Juan José Díaz García-Cervigón. *Estudio de Índices de vegetación a partir de imágenes aéreas tomadas desde UAS/RPAS y aplicaciones de estos a la agricultura de precisión*. 2015.
- [4] Matias L. Marotte. «Agricultura de Precisión». En: *Ciencia y Tecnología* 10 (2010).
- [5] Portal PQS. *¿Qué hace un ingeniero agrónomo? Perfiles de carrera*. URL: <http://www.pqs.pe/actualidad/noticias/que-hace-un-ingeniero-agronomo-perfiles-de-carrera>.
- [6] Rafael C. González y Richard E. Woods. «Digital Image Processing». En: *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* PAMI-3 (1981), págs. 242-243.
- [7] Isahit SÁNCHEZ-SUÁREZ y col. «Caracterización Nutricional de un Cultivo Controlado de Jitomate Silvestre Mediante Imágenes Multiespectrales». En: *Revista de Investigación y Desarrollo* 3.10 (2017), págs. 31-38.
- [8] Eliane Ceccon. *Restauración en bosques tropicales: fundamentos ecológicos, prácticos y sociales*. Oct. de 2013. ISBN: 978-84-9969-615-7.
- [9] Richard Szeliski. *Computer Vision. Algorithms and Applications*. Springer, 2010. URL: <http://szeliski.org/Book/>.
- [10] OpenCV. *Camera calibration With OpenCV*. URL: https://docs.opencv.org/2.4/doc/tutorials/calib3d/camera_calibration/camera_calibration.html.
- [11] OpenCV. *Feature Matching with FLANN*. URL: https://docs.opencv.org/2.4/doc/tutorials/features2d/feature_flann_matcher/feature_flann_matcher.html#feature-flann-matcher.
- [12] Radke Richard J. *Computer Vision for Visual Effects*. Cambridge University Press, 2012. URL: <https://cvfxbook.com/>.
- [13] Pablo Fernández Alcantarilla, Adrien Bartoli y Andrew J. Davison. «KAZE Features». En: *ECCV*. 2012.
- [14] Pablo Fernández Alcantarilla, Jesús Nuevo y Adrien Bartoli. «Fast Explicit Diffusion for Accelerated Features in Nonlinear Scale Spaces». En: *BMVC*. 2013.

- [15] Xin Yang y Kwang-Ting Cheng. «LDB: An ultra-fast feature for scalable Augmented Reality on mobile devices». En: *2012 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR)* (2012), págs. 49-57.
- [16] Eli Shechtman y Michal Irani. «Matching Local Self-Similarities across Images and Videos». En: *2007 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition* (2007), págs. 1-8.
- [17] Paul A. Viola y Michael J. Jones. «Robust Real-Time Face Detection». En: *International Journal of Computer Vision* 57 (2001), págs. 137-154.
- [18] MAPIR. *Survey2 Camera - NDVI Red+NIR*. URL: <https://www.mapir.camera/collections/survey2/products/survey2-camera-ndvi-red-nir>.
- [19] Ned Horning. *Calibrating raw images - a step toward JPEG calibration?* URL: <https://publiclab.org/notes/nedhorning/06-23-2014/calibrating-raw-images-a-step-toward-jpeg-calibration>.
- [20] Ben Himme. *CROSS SECTION OF A LEAF [BASIC]*. URL: <https://www.pathwayz.org/Tree/Plain/CROSS+SECTION+OF+A+LEAF+%5BBASIC%5D>.
- [21] Teledetección. *Tema 1 Fundamentos físicos de la teledetección*. URL: <http://www.um.es/geograf/sig/teledet/fundamento.html>.
- [22] Green Aero Tech. *What Is NDVI?* URL: <http://www.greenaerotech.com/what-is-ndvi/>.
- [23] Ian Sommerville. *Software Engineering: (Update) (8th Edition) (International Computer Science)*. Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., 2006.

sinc(r) Research Institute for Signals, Systems and Computational Intelligence (sinc.unl.edu.ar)
F. Castiello, C. E. Martínez & E. M. Albornoz, "Software para realizar agricultura de precisión aplicando procesamiento por imágenes captadas por dron (Undergraduate project)"
Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas - Universidad Nacional del Litoral, 2018.

Anexo



FICH



UNL

Universidad Nacional del Litoral
Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas

Proyecto Final de Carrera
Ingeniería en informática

**Software para realizar
agricultura de precisión
aplicando procesamiento por
imágenes captadas por dron**

Alumno: Castello Facundo

Director: Martinez Cesar

Co-Director: Albornoz Enrique

Resumen

La necesidad de contar con datos confiables y en tiempo real, hace que la agricultura de precisión avance en el desarrollo de herramientas que ayuden a optimizar y a hacer más eficiente la producción, por lo tanto, es conveniente aprovechar los beneficios que ofrece la tecnología para implementar la agricultura de precisión como herramienta agrícola. La utilización de un dron equipado con los sensores necesarios para supervisar cultivos, permite al productor elaborar estrategias para hacer más eficiente el uso de insumos en el campo según las necesidades reales de cada cultivo. En este proyecto se busca implementar un software que mediante técnicas de procesamiento digital por imágenes, realice agricultura de precisión. Las imágenes a procesar, van a ser obtenidas por medio de recorridos de una parcela realizados por dron.

Palabras claves

Dron, agricultura de precisión, cámara multiespectral, orto-mosaico, procesamiento digital de imágenes.

1. Justificación

Una de las ramas económicas más importantes de la Argentina es la agricultura. No solo satisface la demanda interna sino que además sus productos se exportan al mundo. Desde la época de la colonia hasta el comienzo de este nuevo milenio, ha sufrido diversas transformaciones que le han permitido posicionarse como un modelo productivo global. Esto hace que sea de especial relevancia a la gestión de parcelas agrícolas sobre la base de la observación, la medida y la actuación frente a la variabilidad del cultivo. A esto último se le llama agricultura de precisión y se presenta como una excelente herramienta útil para maximizar rendimientos en los sitios donde sea económico hacerlo y minimizar los costos en áreas del lote con limitantes económicamente incorregibles, pero por sobre todas las cosas viene a vincular al productor con el concepto de sustentabilidad del medio ambiente. Concepto que durante décadas se dejó de lado y solo aparecía la rentabilidad por hectárea [1]. Se puede decir que el productor agropecuario se ve ampliamente beneficiado por la implementación de agricultura de precisión, ya que, al poder utilizar de forma más óptima los recursos, resultaría en mayores ganancias para este.

Como indicó el ingeniero agrónomo Raúl Andrade “Actualmente el ingeniero agrónomo se encarga de sacarle provecho al suelo al clima y al hombre, sin dañarlos. De esta manera genera alimentos que beneficiaran al desarrollo de la sociedad” [2]. Para gran parte de la realización de esto, se requiere de un arduo trabajo de campo con la finalidad de estar en condiciones de tomar una serie de decisiones que conlleven a un resultado óptimo. Este trabajo se encuentra limitado por las capacidades del ser humano en comparación con las de una máquina, ya que esta permite un procesamiento de datos a una velocidad que no tiene comparación con la del cerebro, además de que con la tecnología de hoy en día se pueden realizar acciones automatizadas que permiten que el personal pueda ocupar el tiempo en otras tareas de igual o mayor importancia. Por otro lado el trabajo que realiza el ingeniero agrónomo, además de ser muy amplio, requiere de mucho conocimiento y experiencia, por lo que no se puede reemplazar por una ‘máquina’ pero lo que sí se puede hacer es brindarle una serie de herramientas para optimizar y hacer más efectivas algunas de sus labores que debe llevar a cabo.

Utilizar las herramientas que la informática brinda para trabajos como este, tienen un gran impacto en varios ámbitos. En el caso particular del que se trata en este documento se puede nombrar varios medios que se van a ver positivamente afectados, como el económico, ya que se podrá dar un uso mucho más efectivo de los recursos con los que se cuenta, esto a la vez va a influir en el medio ambiente, debido a que al tener mayor conocimiento sobre el estado global actual de la zona observada, se minimizaría el efecto negativo que tienen mucho de los productos que se usan en este rubro. Por ejemplo, utilizando procesamiento digital de imágenes, se puede saber qué zonas de una parcela se encuentran contaminadas

por maleza y utilizar esta información para fumigar solo lugares específicos, minimizando la huella dejada en la tierra (impacto en el medio ambiente) y reduciendo los costos que realizar esto en toda una parcela conllevaría (impacto en la economía) [3]. Otra ventaja que es importante mencionar es que se minimizaría el trabajo de campo que el ingeniero agrónomo tiene que realizar, brindándole muchos de los datos que este requiere y permitiendo que concentre su tiempo en una realización óptima de otras tareas.

Con la realización de este proyecto se busca la obtención y análisis de datos útiles acerca de cada etapa de un determinado proceso de cultivo que se esté llevando a cabo en una parcela. El ingeniero agrónomo utilizara estos como una ayuda para concretar algunas de sus tareas, entre las cuales cabe nombrar:

- 1) Tomar decisiones concernientes a la producción agrícola, el desarrollo sustentable y el aprovechamiento y manejo racional de los recursos naturales.
- 2) Proponer soluciones a los problemas técnicos y económicos.
- 3) Generar y transferir conocimientos y técnicas que optimicen la productividad agrónoma.

La obtención de los datos antes nombrados será mediante la utilización de un dron (vehículo aéreo no tripulado) y por medio del siguiente procedimiento. Utilizando el vehículo aéreo recientemente referenciado, se obtendrán imágenes de una parcela de la que se quiera adquirir información sobre su estado. Luego, con estas imágenes se realizara un mosaico panorámico de toda la estructura a analizar, sobre el cual se emplearan herramientas de procesamiento digital de imágenes para examinarlo y extraer automáticamente una serie de datos correspondientes al estado de los suelos y el cultivo.

Se encuentran disponibles investigaciones que tratan temas relacionado con lo que se va a realizar. Por ejemplo hay un artículo que informa algunas experiencias relacionadas con el análisis de cultivos de viñedos y tomates, implementando agricultura de precisión por medio de imágenes capturadas por dron [4]. También existen empresas nacionales que prestan el servicio de vigilancia de cultivos mediante imágenes satelitales, las cuales se obtienen cada 16 días, lo cual no permite tener una evaluación aceptable sobre el estado actual de la zona a observar [5]. También hay empresas fuera del país que prestan el servicio de vigilancia de cultivos mediante drones, incluso algunas venden el equipo que realiza esa función [6], pero, además de su elevado precio, estos son sistemas comerciales cerrados por lo cual no se pueden agregar funcionalidades, ni adaptarlas al caso de estudio.

En resumen, para suplir las limitaciones que el ingeniero agrónomo tiene por su condición de humano, es conveniente aprovechar los beneficios que ofrece la tecnología para implementar la agricultura de precisión como herramienta agrícola.

Por un lado, la utilización de un dron brinda la ventaja de ofrecer imágenes aéreas cubriendo grandes superficies por su capacidad de volar, por otro lado, el uso de una computadora para realizar análisis profundos en un tiempo relativamente corto, gracias a la velocidad de procesamiento que esta posee. Estos instrumentos permiten la gestión de parcelas agrícolas sobre la base de la observación y la medida frente a la variabilidad del cultivo.

2. Objetivos

2.1 Objetivo general

Desarrollar un sistema de captura y análisis de imágenes aéreas para la evaluación automática de parcelas en agricultura de precisión.

2.2 Objetivos específicos

- Diseñar la experimentación en campo con dron para obtención de imágenes, realizar pruebas, ajustes y correcciones al método.
- Diseñar y desarrollar técnicas de procesamiento de imágenes para la generación de mosaicos panorámicos y extracción de información útil.
- Implementar métodos para cálculo de diferentes parámetros que informen sobre el estado del campo: cobertura arbórea o área foliar, detección de malezas, u otra tarea relacionada sobre los datos disponibles.
- Calcular índices objetivos sobre el estado del campo y evaluar el sistema sobre casos de uso.
- Generar reportes de desempeño obtenido y redactar informes técnicos periódicos.

3. Alcance

En las limitaciones de este proyecto, es de importancia aclarar que el estudio a realizar será sobre la especie de planta cuyo proceso de cultivo se esté llevando a cabo en la parcela a observar. El motivo para esto es que el tiempo que se

dispone solo permite realizar los experimentos necesarios en un caso de estudio.

Cabe aclarar que el sistema a desarrollar se encargara de brindar los datos que pueden bien ser utilizados o no para el proceso de toma de decisiones y resolución de problemas, pero su influencia depende directamente del personal que se ocupe de estos procesos, es decir, el software no indicara que se requiera tomar algún cambio de dirección en cuanto a los procedimientos que se estén llevando a cabo, solo se limitara a proporcionar datos que puedan ayudar a concluir dicho requerimiento.

Por último, cabe señalar que este trabajo se limitara a la detección de plagas de origen vegetal (en caso de implementarse esta funcionalidad) y no se implementara la localización de plagas de origen animal, como por ejemplo Isocas.

4. Metodología

Para el cumplimiento óptimo de los objetivos planteados en este proyecto, se va a implementar un modelo de proceso incremental, el cual aplica secuencias lineales en forma escalonada a medida que avanza el calendario de actividades. Cada secuencia lineal produce “incrementos” de software susceptibles de entregarse. Estos, son de naturaleza iterativa y producen con mucha rapidez versiones funcionales del software [7].

El motivo principal por el que implementare esta metodología, es que el proyecto a realizar tiene una estructura modular, donde la salida de cada módulo es utilizada como entrada para el que le sigue. La principal razón de esto es que los recursos, con el conjunto de habilidades necesarios, no se encuentran disponible en su totalidad al momento de implementar cada módulo, por ejemplo, para el diseño y desarrollo de técnicas para la generación de mosaicos panorámicos, no se tienen las imágenes usadas como base de datos para esto, por lo tanto previamente se va a requerir capturarlas por dron. Por otro lado, al acotar el tamaño en los incrementos, resulta menos dificultoso acomodar cambios.

Incremento 1: En esta primera instancia se requiere aprender a usar y configurar el dron de manera que recorra una parcela de una forma específica (cubriendo toda el área a analizar), y al mismo tiempo se realice la captura de fotos. La configuración será necesaria para que el dron saque imágenes a un intervalo de segundos a indicar, lo cual, a una velocidad constante, significará que sacara fotos cada una determinada distancia. Para lograr esto, se deben concretar las siguientes etapas:

- **Estudiar información sobre el dron:** Consiste en leer bibliografía que indique como usar y configurar el dron para el propósito previamente explicado.

- **Realizar recorrido y obtención de imágenes con el dron:** Consiste en programar el recorrido del dron y obtención de imágenes, para que realice un recorrido específico y que además realice capturas de fotos a un intervalo de tiempo que le sea indicado. Luego, se debe verificar que este recorrido se realice de la manera deseada, y en caso de que esto no ocurra, realizar las correcciones y ajustes necesarios.
- **Documentar:** Se documentará lo aprendido en este incremento, para que indicar, de forma sencilla y breve, como utilizar y configurar el dron para que concrete un recorrido específico.
- **Redactar el informe del incremento 1:** Por último se redactara el informe que plasmara lo concluido en este incremento.

Incremento 2: En esta instancia se desarrollara un software que, mediante una cierta cantidad de imágenes y aplicando técnicas del procesamiento de imágenes, arme un orto-mosaico. Para esto se requiere realizar trabajo de campo en la parcela en la cual se busca realizar el análisis, para capturar imágenes. Luego, se investigarán y desarrollarán las técnicas de procesamiento de imágenes para la generación de orto-mosaicos. Para lograr esto, se deben concretar las siguientes etapas:

- **Generar base de datos de imágenes:** En esta etapa se realizan varios recorridos del área a analizar con el dron previamente configurado, para generar una base de datos con las imágenes que se obtengan.
- **Software de generación de orto-mosaicos:** Se estudiarán técnicas de procesamiento digital de imágenes y de la biblioteca OTB. Luego, utilizando la base de datos de imágenes, las técnicas estudiadas y la biblioteca OTB, se diseñará e implementará el sistema de generación de orto-mosaicos. Por último se realizarán las pruebas que sean necesarias.
- **Redactar el informe del incremento 2:** Por último se redactara el informe que plasmara lo concluido en este incremento.

Incremento 3: Al software desarrollado en la etapa anterior, se le agregara la funcionalidad de brindar información útil sobre la imagen que éste genera y, con esta, generar una base de datos con datos del cultivo que más adelante se utilizarán. Un ejemplo de esto es, extraer de la imagen el NIR (infrarrojo cercano) y el rojo que luego serán necesarios para calcular el NDVI. Para lograr dicha funcionalidad, se investigaran y desarrollaran las técnicas de procesamiento de imágenes para la extracción de información útil. Para lograr esto, se deben concretar las siguientes etapas:

- **Agregar funcionalidad de extracción de información útil:** En esta etapa se realizarán revisiones bibliográficas sobre técnicas de procesamiento digital de imágenes para segmentación. Luego, utilizando las técnicas

estudiadas y la biblioteca OTB, se diseñara e implementará el sistema para extracción de información útil. Por último se realizaran las pruebas que sean necesarias.

- **Generar base de datos con información de los cultivos:** Haciendo uso del software para obtención de orto-mosaicos y extracción de información útil, se almacenara información y orto-mosaicos en la base de datos.
- **Redactar el informe del Incremento 3:** Por último se redactara el informe que plasmara lo concluido en este incremento.

Incremento 4: En esta última instancia, utilizando los datos generados anteriormente, se calcularán índices objetivos sobre el estado del campo y se evaluarán sobre el sistema. La información recolectada y calculada puede ser empleada para evaluar con mayor precisión la densidad óptima de siembra, estimar la cantidad adecuada de fertilizantes o de otros insumos necesarios, y predecir con más exactitud el rendimiento y la producción de los cultivos. Por otro lado, se le implementará una función al software para que genere reportes de desempeño obtenido y redacte informes técnicos periódicos. Para lograr esto, se deben concretar las siguientes etapas:

- **Agregar funcionalidad para calcular índices objetivos sobre el estado del campo:** En esta etapa se realizaran revisiones bibliográficas sobre el cálculo de índices de vegetación que sean de utilidad para indicar el estado del campo. Luego, utilizando las técnicas estudiadas y la base de datos con la información extraída de las imágenes, se diseñara e implementará el sistema para extracción de información útil. Por último se realizaran las pruebas que sean necesarias.
- **Agregar funcionalidad de generación de reporte de desempeño:** Con todos los datos generados por las distintas funcionalidades del software, se diseñara e implementara una función para la generación de reporte de desempeño. Por último se realizaran las pruebas que sean necesarias.
- **Agregar funcionalidad de redacción de informes técnicos periódicos:** La ultima funcionalidad a implementar en este software será la de, mediante todos los datos generados, redactar informes técnicos periódicos que indiquen el estado actual del campo. Luego de que este sea diseñado e implementado, se realizaran las pruebas que sean necesarias.
- **Redactar el informe del incremento 4:** Por último se redactara el informe que plasmara lo concluido en este incremento.

Para cada incremento, habrá entregables que deben ser aprobados por el Director de Proyecto para la validación, y que servirán como entradas para la etapa siguiente. En el **incremento 1** se tendrá el primer entregable el cual va a ser el dron ya modificado y una descripción de cómo se usa y como configurarlo

para obtener las imágenes. La finalización del **incremento 2** producirá un software que, teniendo como entrada las imágenes de la parcela a analizar, su salida será el orto-mosaico. En el **incremento 3** al software se le agrega la funcionalidad de extraer información útil generar una base de datos con datos del cultivo. Finalmente, con la terminación del **incremento 4**, se tendrá el software final que, además de realizar todo lo antes nombrado, calculará diferentes parámetros que informen sobre el estado del campo, generará reportes de desempeño obtenido y redactará informes técnicos periódicos.

5. Plan de tareas

1 Incremento 1 (85 horas).

- 1.1 Estudiar información sobre el dron (20 horas)
 - 1.1.1 Revisar bibliografía de uso de dron (10 horas).
 - 1.1.2 Revisar bibliografía de configuración de dron (10 horas).
- 1.2 Realizar recorrido y obtención de imágenes con el dron (35 horas).
 - 1.2.1 Programación de recorrido y obtención de imágenes con el dron (5 horas).
 - 1.2.2 Pruebas de recorrido y obtención de imágenes con el dron (20 horas)
 - 1.2.3 Correcciones y ajustes del recorrido y obtención de imágenes con el Dron (10 horas).
- 1.3 Documentar (20 horas).
 - 1.3.1 Documentar guía de uso (10 horas).
 - 1.3.2 Documentar guía para configuración del dron (10 horas).
- 1.4 Redactar el informe del incremento 1 (10 horas).

2 Incremento 2 (145 horas).

- 2.1 Generar base de datos de imágenes (15 horas).
 - 2.1.1 Recorrer con dron (13 horas).
 - 2.1.2 Almacenar imágenes (2 horas).
- 2.2 Software de generación de orto-mosaicos (115 horas).
 - 2.2.1 Elicitar requerimientos (5 horas).
 - 2.2.2 Estudiar técnicas de procesamiento digital de imágenes (30 horas).
 - 2.2.2.1 Revisión bibliográfica de biblioteca OTB (15 horas).
 - 2.2.2.2 Revisión bibliográfica de técnicas disponibles (15 horas).
 - 2.2.3 Diseño.(30 horas)
 - 2.2.3.1 Diseñar arquitectura de software (10 horas).
 - 2.2.3.1 Diseñar técnica para generación de orto-mosaico (20 horas).

2.2.4 Implementar técnicas para generación de orto-mosaico (30 horas).

2.2.5 Realizar pruebas de técnicas para generación de orto-mosaico (20 horas).

2.3 Redactar el informe del incremento 2 (15 horas).

3. Incremento 3 (120 horas).

3.1 Agregar funcionalidad de extracción de información útil (90 horas).

3.1.1 Elicitar requerimientos.

3.1.2 Revisar bibliográfica de técnicas de procesamiento digital de imágenes para segmentación (10 horas).

3.1.3 Diseño (30 horas).

3.1.3.1 Diseñar arquitectura de software (10 horas).

3.1.3.2 Diseñar técnicas de procesamiento digital de imágenes para segmentación (20 horas).

3.1.4 Desarrollar técnicas de procesamiento digital de imágenes para segmentación (35 horas).

3.1.5 Probar técnicas de procesamiento digital de imágenes para segmentación (15 horas).

3.2 Generar base de datos con información de los cultivos (15 horas).

3.2.1 Utilizar el software obtener orto-mosaicos (5 horas).

3.2.2 Utilizar el software extraer información útil (5 horas).

3.2.3 Almacenar información y orto-mosaicos en base de datos (5 horas).

3.3 Redactar el informe del Incremento 3 (15 horas).

4 Incremento 4 (145 horas).

4.1 Agregar funcionalidad para calcular índices objetivos sobre el estado del campo (50 horas).

4.1.1 Revisar bibliografía de índices objetivos sobre el estado del campo (10 horas).

4.1.2 Diseñar la arquitectura de la funcionalidad de cálculo de índices objetivos sobre el estado del campo (15 horas).

4.1.3 Desarrollar la funcionalidad de cálculo de índices objetivos sobre el estado del campo (15 horas).

4.1.4 Probar la funcionalidad de cálculo de índices objetivos sobre el estado del campo (10 horas).

4.2 Agregar funcionalidad de generación de reporte de desempeño (40 horas).

4.2.1 Diseñar la arquitectura de la funcionalidad de generación de reporte de desempeño (15 horas).

4.2.2 Desarrollar la funcionalidad de generación de reporte de desempeño (15 horas).

4.2.3 Probar la funcionalidad de generación de reporte de desempeño (10 horas).

4.3 Agregar funcionalidad de redacción de informes técnicos periódicos (40 horas)

4.3.1 Diseñar la arquitectura de la funcionalidad de redacción de informes técnicos periódicos (15 horas).

4.3.2 Desarrollar la funcionalidad de redacción de informes técnicos periódicos (15 horas).

4.3.3 Probar la funcionalidad de redacción de informes técnicos periódicos (10 horas).

4.4 Redactar el informe del incremento 4 (15 horas).

Total de horas: 495 hs/hombre

6. Cronograma

Para la realización del cronograma se tomó como fecha de inicio del proyecto, el día 16/01/2017. Esta fecha se debe a que en ese momento el cultivo va a estar apto para ser analizado. Estimando 5 horas de trabajo diarias, 5 días a la semana, la fecha de finalización del proyecto será el 01/06/2017. Imagen del cronograma se adjunta en páginas 12, 13 y 14.

7. Puntos de control y entregables

Los puntos de control considerados para este proyecto, coinciden con las fechas de presentación de los entregables. La fecha y descripción de cada entregable quedan definidas a continuación:

Entregable 1: Guía para uso del dron, Guía para configuración del dron e Informe del incremento 1.

Fecha de entrega: 07/02/2017

Descripción: Informes en los que se detallara como usar el dron para que recorra una parcela, como configurarlo para la captura de imágenes, de manera que estas puedan ser utilizadas más adelante en el software, y por último, un documento que detallara información relevante sobre el primer incremento.

Entregable 2: Software para la generación de orto-mosaicos e Informe del incremento 2.

Fecha de entrega: 20/03/2017

Descripción: Por un lado se tiene el software que, teniendo como entrada las imágenes capturadas de la manera indicada en la 'Guía de configuración del dron' de la parcela a analizar, su salida será el orto-mosaico. Por otro lado, también se entrega el informe que detalla información relevante sobre el segundo incremento.

Entregable 3: Actualización de software e Informe del incremento 3.

Fecha de entrega: 21/04/2017

Descripción: Al software previamente entregado, se le agrega la funcionalidad de extraer información útil. También se entrega el Informe que detalla información relevante sobre el tercer incremento.

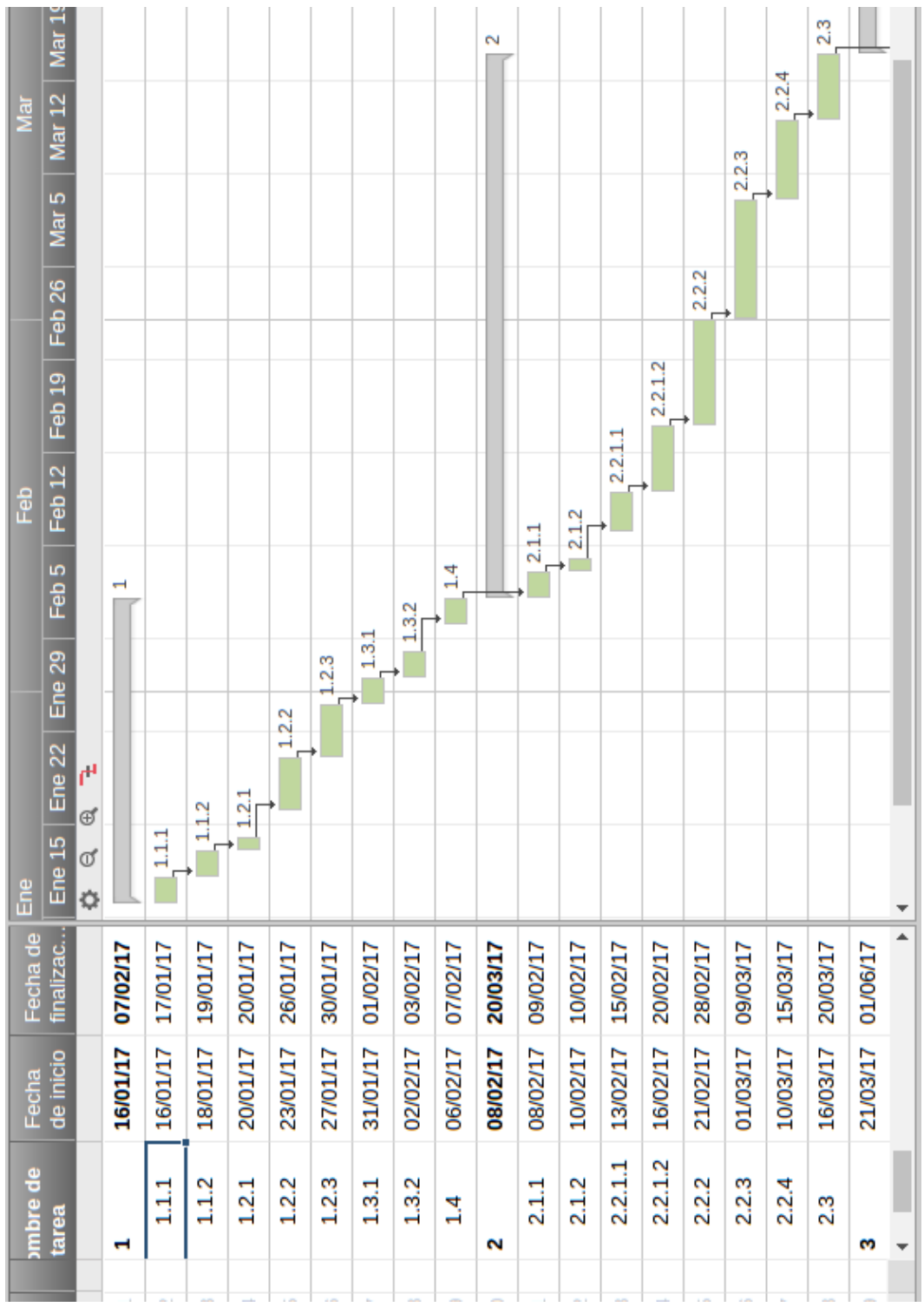
Entregable 4: Actualización del software e Informe de incremento 4.

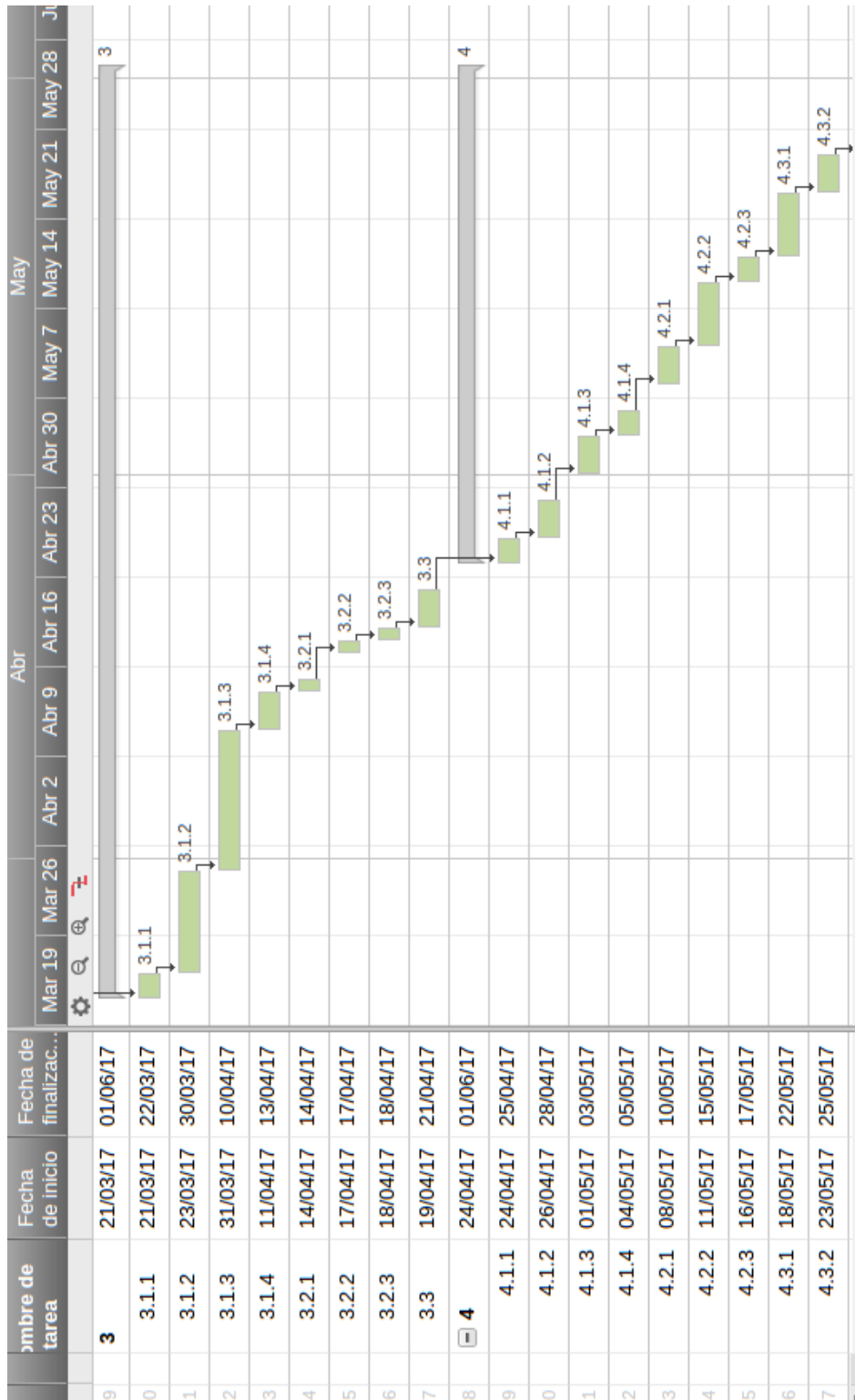
Fecha de entrega: 01/06/2017

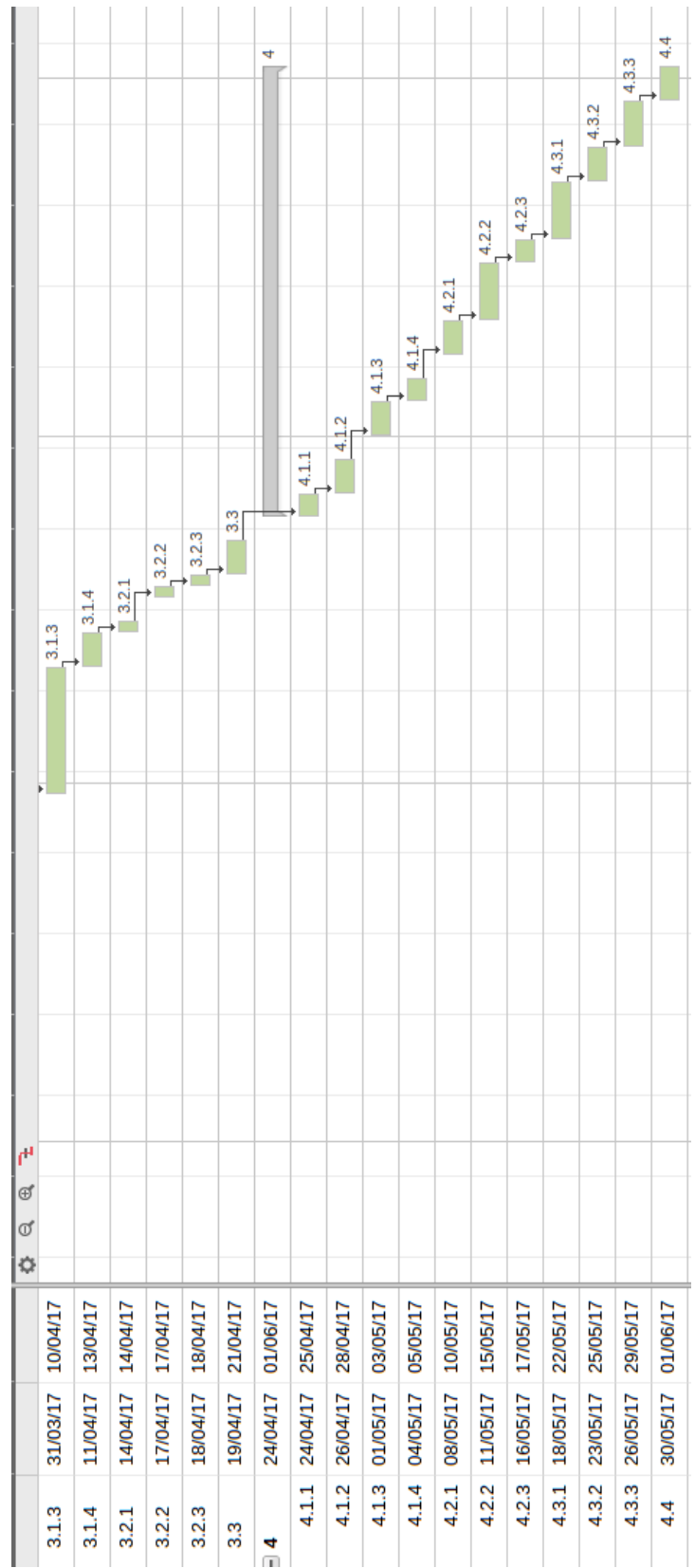
Descripción: Al software se le agregan las funcionalidades para calcular índices objetivos sobre el estado del campo, generar reporte de desempeño y redactar informes técnicos periódicos. Por último, se entrega el Informe que detallara información relevante sobre el cuarto incremento.

8. Criterios de aceptación

Además del cumplimiento de los objetivos especificados en el documento anterior, su aceptación va a estar ligada a la corrección del informe final por parte de los directores del proyecto.







9. Riesgos

□ Equipo de trabajo:

Falta de disponibilidad del director

Descripción: Que debido a situaciones personales o laborales, el director no esté disponible en algún momento del proyecto.

Probabilidad: Baja.

Impacto: Medio.

Mitigación: Realizar varias consultas que demanden poco tiempo, en lugar de pocas que demanden mucho tiempo.

Contingencia: Consultar al co-director.

□ Recursos:

Insumos defectuosos

Descripción: Que los insumos obtenidos tengan algún defecto en su fabricación.

Probabilidad: Baja.

Impacto: Alto.

Mitigación: Comprar insumos a proveedores reconocidos y confiables.

Contingencia: Utilizar la garantía de los insumos para obtener otros sin defectos.

Falta de disponibilidad del dron

Descripción: No tener el dron disponible para realizar las diferentes tareas del proyecto. Esto puede ser por algún defecto de fábrica, o por cualquier imprevisto.

Probabilidad: Baja.

Impacto: Alto.

Mitigación: Aprender a usar el dron en lugares seguros donde el daño de cualquier impacto sea mínimo.

Contingencia: Conseguir los insumos para reparar el dron.

□ Factores externos:

Retraso en la entrega de insumos

Descripción: Que la entrega de insumos no se realice en el tiempo esperado, por lo que no se podrá comenzar con ciertas etapas del proyecto a tiempo.

Probabilidad: Media.

Impacto: Alto.

Mitigación: Comprar los insumos a proveedores confiables.

Contingencia: Contar con insumos alternativos de procedencia nacional.

Restricciones en las importaciones

Descripción: Algunos de los recursos necesarios para realizar el proyecto, deben ser importados. Por su elevado costo, esto puede ser un problema por las restricciones en las importaciones.

Probabilidad: Media.

Impacto: Alto.

Mitigación: Conseguir los permisos necesarios para poder concretar las importaciones sin inconvenientes.

Contingencia: Conseguir un producto similar dentro del país, que cumpla con los requisitos necesarios.

□ Información/Conocimiento:

Falta de fiabilidad del material

Descripción: Por el uso de sitios web como parte de los recursos bibliográficos, pueden presentarse inconsistencias en la bibliografía.

Probabilidad: Baja.

Impacto: Medio.

Mitigación: Utilizar fuentes bibliográficas confiables.

Contingencia: Si llegara a darse que algún error no fue eludido mediante la estrategia de mitigación, y paso a formar parte de la estructura de conocimiento, esto será detectado en alguna de las dos etapas siguientes, y en ese caso deberá procederse a una nueva revisión bibliográfica.

10. Costos

COSTO	CANTIDAD	PRECIO U	SUBTOTAL
Bienes de capital:			
Notebook (amortización)	5 meses	316	1580
Herramientas varias			800
Consultorías			
Consulta sobre vuelo de dron	4h	125	500
Asesoramiento de miembros del sinc(i)	15h	200	3000
Materiales e insumos			
Dron (adquisición)	1	10766	10766
Cámara multiespectral (adquisición)	1	5600	5600
Kit accesorios para cámara (adquisición)	1	450	450
RRHH			
Horas de programador	500h	148	74000
Horas de director	20h	204	4080
Horas de co-director	20h	204	4080
Viajes y viáticos			
Transporte (Santa Fe – Campo, Campo – Santa Fe)	20	400	8000
Otros			
Acceso a internet	5 meses	200	1000
Energía Eléctrica	(0.525kw/h)*300h=157,5kw	0,913	143,7975
Impresión y anillado de informe final	3	250	750
Impresión entregables	6	40	240
TOTAL			114989,7975

11. Recursos

- Recursos existentes:

Hardware:

-Notebook Banghó Max Intel Core I7, 8gb RAM, 1tb Disco Rígido, 15.6" Pantalla.

Software:

- Entorno de desarrollo: Zinjai, Eclipse.
- Sistema Operativo: Linux y Windows 10.
- Entorno para redacción de informes: LibreOffice 5.1.2.2.

Recursos Humanos:

- Alumno que realiza el proyecto.
- Director y co-director del proyecto.

Insumos y servicios:

- Insumos de oficina: lapicera, hojas, etc.
- Infraestructura necesaria para desarrollar el proyecto.
- Servicio de internet.
- Servicio de electricidad.

- Recursos necesarios:

- Dron 3DR Solo.
- Cámara multiespectral Survey2.
- Kit de accesorios para cámara.

12. Referencias

- [1] Marote, M. L. Agricultura de precisión. *Ciencia y Tecnología*, 10.
- [2] Portal PQS. ¿Qué hace un ingeniero agrónomo? Perfiles de carrera. Recuperado de: <http://www.pqs.pe/actualidad/noticias/que-hace-un-ingeniero-agronomo-perfiles-de-carrera>
- [3] González, R. C. and Woods, R. E. [2002]. Digital Image Processing, 2nd ed., Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ.
- [4] Candiago, S., Remondino, F., De Giglio, M., Dubbini, M., & Gattelli, M. [2015]. Evaluating Multispectral Images and Vegetation Indices for Precision Farming Applications from UAV Images. *Remote Sensing*, 7(4), 4026-4047.
- [5] GeoAgro by Tek [2015]. Solución SAT. Recuperado de: <http://site.geoagro.com/es/producto/soluci%C3%B3n-sat>
- [6] ATyges [2016]. Topodron. *Recuperado de:* <http://www.atyges.es/drones/sistemas/5/topodron>
- [7] Roger S [2010]. Presman. Ingeniería del Software: Un Enfoque Práctico.