

Instituto de Computación  
Facultad de Ingeniería  
Universidad de la República

# **Introducción de tecnologías en sistemas de producción lechera para aumentar la productividad y eficiencia**

## **Tesis de grado**

Paysandú, Uruguay, Marzo de 2017

**Autor**

Andrés Pías

**Supervisor**

MSc. Gastón Notte

**Co-supervisores**

Dr. Ana Espasandín / MSc. Juan Cardelino

**Asesor**

Dr. Héctor Cancela

## Resumen

---

La producción lechera ocupa un lugar muy importante en la economía uruguaya. Las condiciones naturales adecuadas (suelo, clima, etc) con las que cuenta Uruguay, lo convierten en un país muy apto para este tipo de producción. El crecimiento ininterrumpido que ha tenido este sector en el país (entre 1975 y 2013), le ha permitido ubicarse actualmente entre los 10 sectores mas exportadores del país que generan mayor valor agregado industrial. A nivel internacional, Uruguay se ubica entre los 25 países exportadores de lácteos del mundo. En particular, las exportaciones de este sector tuvieron un crecimiento de 8% promedio anual en la última década y sumaron US\$ 567 millones en 2016. A diferencia de otros países de la región como Argentina y Brasil que destinan su producción principalmente a abastecer su mercado interno, Uruguay exporta 70% del volumen producido anualmente. A nivel de Latinoamérica, es el mayor productor de leche per cápita, con alrededor de 550 litros y además posee el mercado interno con el consumo de leche mas elevado, alcanzando los 233 litros per cápita al año. Estas razones motivan la aplicación de tecnologías y el desarrollo de propuestas metodológicas y de soluciones informáticas que contribuyan a la resolución de determinados problemas vinculados a este sector.

La alimentación del rodeo vacuno cumple un rol preponderante en los sistemas de producción de leche, por lo que resulta interesante estudiar esta área con el objetivo de incorporar tecnologías que faciliten el manejo o la toma de decisiones. Periódicamente, los responsables de los tambos recorren los potreros con el fin de estimar el alimento disponible, información a partir de la cual determinarán cómo realizarán la asignación de recursos alimenticios entre todas las vacas.

Hasta el momento, los métodos utilizados para la estimación de forraje son los tradicionales de corte, estimación mediante altura o por satélite, pero estos pueden resultar costosos, imprecisos o impracticables. Debido a esto, en este trabajo se proponen alternativas de solución mediante el desarrollo de tecnologías que ayuden a estimar la disponibilidad de recursos de forma precisa y a bajo costo.

En este trabajo, se abordaron dos enfoques metodológicos para estimar la disponibilidad forrajera, haciendo uso de un UAV (Unmanned Aerial Vehicle), autónomo y programable, que incluye una cámara a color, una cámara infrarroja y una minicomputadora. El UAV posibilitó la realización de recorridos automáticos sobre los distintos potreros para obtener imágenes georeferenciadas de las pasturas, a partir de las cuales se estimó el forraje disponible.

La primera metodología utilizada corresponde al procesamiento de imágenes de las pasturas. De acuerdo a esto, el UAV recorrió los potreros, a una altura no superior a los 6 metros, siguiendo determinadas rutas programadas y obteniendo imágenes de las pasturas. A través del procesamiento informático de las mismas se estimó la disponibilidad de recursos alimenticios disponibles.

La segunda metodología utilizada fue la de mapping 3D. Para esto se realizaron recorridos de los potreros con el UAV en formato de Zig Zag y a alturas superiores a los 20 metros. Esta técnica implicó un tipo de procesamiento de imágenes distinto al

mencionado anteriormente. El objetivo fue generar modelos de superficie que posibilitaran la estimación de las alturas de las pasturas, para finalmente estimar el forraje.

A partir de evaluaciones experimentales, se comprobó que la metodología que genera resultados más precisos en términos de estimación de disponibilidad de forraje es la de mapping 3D. Particularmente, los valores más acertados se registraron para modelos basados en fotografías a color. Por el contrario, la metodología de procesamiento de imágenes generó resultados poco aproximados a la realidad, sin embargo su aplicación requirió consumos de batería del UAV menores a los empleados por la metodología anterior. Para validar los modelos generados, el equipo de agrónomos aplicó técnicas tradicionales de estimación de forraje.

Cabe aclarar que la primera metodología fue desarrollada en conjunto con el equipo de Ingeniería Biológica (departamento de investigación ubicado en la ciudad de Paysandú, orientado a solucionar problemas complejos de diferentes campos de las ciencias de la vida, mediante la aplicación de metodologías propias de ingeniería), sin requerir demasiado tiempo de desarrollo, ajuste, calibración y pruebas. Sin embargo, es un método muy interesante, sobre el cual se debe seguir trabajando en el futuro para mejorarlo.

# Índice

---

|                                                                          |           |
|--------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1 INTRODUCCIÓN.....</b>                                               | <b>5</b>  |
| 1.1 MARCO CONTEXTUAL.....                                                | 5         |
| 1.2 INTRODUCCIÓN AL PROBLEMA.....                                        | 6         |
| 1.3 OBJETIVOS.....                                                       | 7         |
| <b>2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....</b>                                   | <b>9</b>  |
| 2.1 DEFINICIÓN.....                                                      | 9         |
| 2.2 PROBLEMA AGRONÓMICO.....                                             | 10        |
| 2.3 PROBLEMA TECNOLÓGICO.....                                            | 11        |
| 2.4 REQUERIMIENTOS.....                                                  | 12        |
| 2.4.1 <i>Requerimientos Funcionales</i> .....                            | 12        |
| 2.4.2 <i>Requerimientos no funcionales</i> .....                         | 13        |
| <b>3 SOLUCIÓN DEL PROBLEMA.....</b>                                      | <b>15</b> |
| 3.1 ABORDAJE DE LA SOLUCIÓN.....                                         | 15        |
| 3.2 EQUIPAMIENTO UTILIZADO.....                                          | 17        |
| 3.2.1 <i>Elección de un sensor</i> .....                                 | 17        |
| 3.2.2 <i>Computadora complementaria</i> .....                            | 20        |
| 3.2.3 <i>Arquitectura física del sistema</i> .....                       | 21        |
| 3.3 CONSTRUCCIÓN DE ESTACAS.....                                         | 28        |
| 3.4 MODELOS MATEMÁTICOS.....                                             | 30        |
| 3.4.1 <i>Modelo para capturar fotos a procesarse</i> .....               | 30        |
| 3.4.2 <i>Modelo de recorridos para procesamiento de imágenes</i> .....   | 33        |
| 3.4.3 <i>Modelo de recorridos para mapping 3D</i> .....                  | 34        |
| 3.5 HERRAMIENTAS DE SOFTWARE.....                                        | 37        |
| 3.5.1 <i>Elección de herramientas para control de dispositivos</i> ..... | 37        |
| 3.5.2 <i>Entorno de operación</i> .....                                  | 39        |
| 3.5.3 <i>Arquitectura lógica del sistema</i> .....                       | 40        |
| 3.5.4 <i>Elección de herramientas de procesamiento de imágenes</i> ..... | 40        |
| 3.6 DESARROLLO DE SOFTWARE.....                                          | 44        |
| 3.6.1 <i>Análisis</i> .....                                              | 44        |
| 3.6.2 <i>Diseño</i> .....                                                | 47        |
| 3.6.3 <i>Implementación</i> .....                                        | 50        |
| <b>4 CALIBRACIÓN DEL DRON.....</b>                                       | <b>57</b> |
| 4.1 PARÁMETROS ESPECIALES CONFIGURABLES.....                             | 57        |
| 4.2 VUELOS DE CALIBRACIÓN EN TERRENO DE 50 m2.....                       | 59        |
| <b>5 EXPERIMENTACIÓN.....</b>                                            | <b>64</b> |
| 5.1 EXPERIMENTACIÓN CON 10 ESTACAS.....                                  | 64        |
| 5.2 EXPERIMENTACIÓN CON 30 ESTACAS.....                                  | 65        |
| 5.3 MAPPING 3D PARA ALTURAS IGUALES O MENORES A 20 METROS.....           | 67        |
| 5.4 MAPPING 3D PARA ALTURAS IGUALES O MAYORES A 20 METROS.....           | 69        |
| 5.5 ÚLTIMOS EXPERIMENTOS Y VERIFICACIÓN DE RESULTADOS.....               | 71        |
| <b>6 CONCLUSIONES Y TRABAJO A FUTURO.....</b>                            | <b>78</b> |
| <b>7 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>                                 | <b>82</b> |

# 1 Introducción

---

## 1.1 Marco contextual

El presente proyecto se desarrolló en el contexto del Polo Agroalimentario y Agroindustrial de Paysandú (PAAP). En el marco de la conformación de dicho polo en el Centro Universitario de Paysandú (CUP), una de las líneas de acción consiste en llevar adelante investigaciones que apliquen modelos, herramientas e implementaciones del área de ingeniería para resolver problemas de interés práctico en la actividad agropecuaria, partiendo de las fortalezas existentes en la Estación Experimental Mario A. Cassinoni (EEMAC) y el apoyo de la Facultad de Ingeniería.

La producción lechera es muy importante para la economía uruguaya ya que se intensifica de manera creciente [7] y por eso resulta interesante estudiarla. El problema principal a tratar en este trabajo refiere a dichos procesos productivos. Diariamente, los responsables de los tambos se enfrentan con la dificultad de decidir cómo alimentar al rodeo lechero, para lo cual, entre otras cosas, deben conocer la disponibilidad de recursos alimenticios. A partir de dicha información, es posible determinar la mejor manera de alimentar al rodeo lechero de acuerdo a sus necesidades y requerimientos [8].

Los objetivos de este proyecto fueron el estudio del estado del arte, la propuesta y la evaluación de modelos y técnicas metodológicas y el desarrollo de aplicaciones a ser utilizadas para lograr estimar la disponibilidad de forraje sobre cualquier potrero con el uso de un UAV. Actualmente, los UAVs o VANTs (Vehículos Aéreos no Tripulados) han sido utilizados en múltiples aplicaciones que van desde el ocio, fotografía, hasta asistencia frente a desastres naturales [10]. En este proyecto se utilizó un tipo de UAV, concretamente un dron para la investigación científica de un problema particular de tipo agronómico. El presente trabajo comprende además las estrategias tecnológicas aplicadas para poder dar solución al problema central, como selección de parámetros adecuados de vuelo, o de equipamiento necesario a ser incluido en el UAV.

Este proyecto estuvo vinculado a otro de Facultad de Agronomía bajo la misma temática que comprende el problema de la estimación de disponibilidad. Esta integración fue propuesta para lograr el intercambio de conocimiento entre distintas áreas, debido a que el problema central abarca aspectos agronómicos e informáticos. A su vez, de esta manera fue posible validar los modelos introducidos en este trabajo frente a metodologías tradicionales aplicadas normalmente para este tipo de medición. Esta estrategia permitió determinar la metodología más adecuada en función de los datos reales obtenidos, lo cual de otra manera sería muy dificultoso. Además, los resultados generados en este trabajo servirán de aporte al proyecto de la otra parte.

Por lo dicho, este proyecto tiene carácter multidisciplinario ya que buscó integrar conocimientos, técnicas y estudiantes de Ingeniería y Ciencias Agrarias con el fin de proponer metodologías que faciliten la toma de decisiones y colaboren con la automatización de la información.

## **1.2 Introducción al problema**

Para una correcta administración de los recursos forrajeros, los responsables de sistemas lecheros deben conocer la disponibilidad de pasturas de los distintos potreros que administran. Por esta razón, interesa obtener valores confiables para la cantidad de pasto, medida en kilogramos de materia seca (Kg MS), disponible en cada potrero [8].

Actualmente, existen distintos métodos para estimar la disponibilidad de forraje por unidad de superficie de los potreros [9], los cuales se clasifican en directos o indirectos [11]. Los métodos directos son aquellos que implican la afectación de las pasturas, como por ejemplo, el método tradicional de corte [2]. Por el contrario, los métodos indirectos son aquellos que no requieren ninguna actividad destructiva del potrero, durante el transcurso del análisis, como por ejemplo, la técnica mediante imágenes satelitales [4].

Estas técnicas presentan una serie de inconvenientes, debido a que ninguna plantea una solución rápida y práctica para la estimación de disponibilidad de alimento. Los métodos directos como el de corte, son costosos, requieren mucho entrenamiento y resultan imprecisos para ciertos escenarios [2]. Por otra parte, las imágenes satelitales no comerciales son impracticables para los sistemas lecheros uruguayos.

La técnica tradicional de corte consiste en cortar, secar y pesar el forraje para estimar la cantidad de MS. Para su aplicación debe definirse un protocolo para la toma de un determinado número de muestras de las pasturas, las cuales deben tener determinadas dimensiones que permitan alcanzar buenos resultados. Este procedimiento puede ser realizado antes del pastoreo, después del mismo o en ambas instancias, y genera buenos resultados para pasturas de una especie. Existen múltiples factores que pueden afectar la precisión de esta técnica como son la presencia de animales, la orina y las heces resultantes de los mismos, así como el número de especies constitutivas de las pasturas. En estas circunstancias es necesaria la obtención de un gran número de muestras para generar resultados precisos o realistas [2].

Este método es costoso en términos de tiempo y trabajo. Esto se debe a que luego de cortadas, las muestras deben ser secadas durante un período que puede variar entre 24 a 72 horas. Luego de culminado este proceso, finalmente pueden ser pesadas para determinar la cantidad de MS disponible en las mismas. En este sentido, cuanto más complejo sea el sistema biológico a medir, mas trabajo deberá realizarse para tomar un número de muestras mayor. Debido a que el corte debe realizarse de determinada manera y siguiendo un conjunto de pasos específicos, es necesario contar con entrenamiento para su aplicación. Además, el desconocimiento de las especies que constituyen las pasturas pueden conducir a una mala elección en la cantidad de muestras a tomar, lo que conducirá a resultados poco realistas [2].

La metodología mediante imágenes satelitales es más moderna que las tradicionales e implica la aplicación de tecnologías en la resolución del problema de la estimación de disponibilidad de pasturas. Concretamente, consiste en tomar fotografías mediante satélites para su posterior procesamiento. Estas imágenes son frecuentemente utilizadas para estudiar el índice verde de las pasturas, a partir del cual se es-

tima la disponibilidad a futuro, dato que resulta de interés para el seguimiento forrajero [12].

Las imágenes satelitales que pueden ser adquiridas de forma gratuita son impracticables debido a su resolución, la cual es insuficiente para el estudio de los potreros uruguayos. En otras palabras, dichos potreros quedan representados en estas imágenes por escasos píxeles. Por el contrario, esta técnica tiene mayor aplicabilidad en países de la región, donde los potreros tienen mayor extensión territorial que los uruguayos.

Para obtener información de los recursos alimenticios disponibles en los sistemas lecheros, en este trabajo se propuso el desarrollo de tecnologías nuevas, así como la utilización de otras existentes que permitieran automatizar la adquisición de información útil. Concretamente, se abordó la utilización de un UAV, autónomo y programable, al cual se le incorporarían cámaras digitales para posibilitar la realización de recorridos periódicos y automáticos de los tambos, con el fin de implementar varias metodologías de obtención de imágenes georeferenciadas [13] de las pasturas, que pudieran ser utilizadas para la estimación de disponibilidad de recursos alimenticios. Los datos recolectados serían validados al final del proyecto por los estudiantes de Facultad de Agronomía.

El hecho de que sea una propuesta en general desconocida, para la cual existe poca información y material al respecto, planteó una serie de problemáticas al momento de afrontar el problema conjunto en una primera etapa como son la falta de conocimientos, experiencias previas y trabajos relacionados disponibles. El abordaje interdisciplinario, planteó un interesante desafío en lo que respecta a adaptación a distintas formas de trabajo, enfoques y términos utilizados.

### **1.3 Objetivos**

El objetivo general de este proyecto es desarrollar y evaluar tecnologías que permitan estimar la disponibilidad de forraje, para de esta manera aumentar la productividad y eficiencia, y de esta forma colaborar en la resolución de un problema clave en la agronomía.

Por otro lado, los objetivos específicos del mismo son los siguientes:

- Desarrollar un sistema compuesto por una UAV y una cámara digital que permita la automatización en la obtención de imágenes georeferenciadas de potreros para su utilización en estudios posteriores de disponibilidad de pasturas.
- Generar conocimiento que sirva de base a posteriores trabajos, a partir del descubrimiento, estudio, análisis y evaluación a realizarse sobre las distintas temáticas vinculadas al presente proyecto, como son las características y programación de UAVs, técnicas de estimación de forraje, herramientas tecnológicas aplicadas en el área agropecuaria, etc.

- Desarrollar capacidades de trabajo e integración a un equipo multidisciplinario que permitan afrontar un problema existente en el mundo real utilizando una combinación de metodologías provenientes de diferentes ciencias para su resolución.



## 2 Descripción del problema

---

### 2.1 Definición

El problema a resolver consistió en aplicar métodos tecnológicos adecuados para lograr la realización de recorridos automáticos mediante un UAV con cámaras digitales integradas sobre determinadas áreas a estudiar. Dada una ruta especificada por el usuario, formada por un conjunto de puntos ubicados en un potrero, el UAV debía ser capaz de seguirla mientras la cámara tomaba imágenes georeferenciadas de las pasturas. Sobre las imágenes obtenidas debía aplicarse un algoritmo que procese las imágenes adecuadamente para obtener estimaciones de la altura de las pasturas, a partir de los cuales luego fuese posible deducir la disponibilidad de alimento. El problema en cuestión estuvo compuesto de dos grandes grupos de problemas. Por un lado, existieron problemas del tipo agronómico y por el otro, tecnológicos.

En los estudios agronómicos, como el de las pasturas y el de los sistemas de producción lechera, se podrían enumerar múltiples factores que afectan, modifican, o determinan distintas condiciones en dichos sistemas, como por ejemplo tipo de pastura o época del año [14]. Sin embargo, para el abordaje de los aspectos tecnológicos de este proyecto en primer momento no se hicieron distinciones acerca de estos aspectos. Por lo tanto, el problema a resolver desde el punto de vista agronómico, básicamente fue lograr la estimación de forraje sobre cualquier tipo de pastura. Más detalles acerca de este problema pueden ser consultados en la Sección 2.2.

Por otra parte, también fue necesario dar solución a los problemas tecnológicos, como por ejemplo, el de lograr el vuelo y control automático del UAV. En estos intervienen varios aspectos matemáticos, físicos y tecnológicos, que debieron ser analizados y considerados en la solución para lograr el correcto enrutamiento y posicionamiento del dron sobre los potreros [15]. Más detalles del problema tecnológico pueden ser consultados en la Sección 2.3.

De acuerdo a los objetivos específicos presentados anteriormente, en este proyecto se planteó aplicar conocimientos agronómicos y computacionales para brindar una solución acorde a las necesidades presentadas que ayude en la toma de decisiones en sistemas de producción lechera. Esto condujo a que el proyecto tuviera un gran componente de investigación.

Durante el desarrollo de este proyecto existió una comunicación fluida con los integrantes del proyecto de Facultad de Agronomía. Entre otras cosas, ellos fueron los responsables por la determinación del potrero en el cual fueron efectuadas las primeras experiencias de campo de ambos proyectos.

A medida que avanzaba el proyecto la comprensión del problema fue mayor y se fue interiorizando en profundidad tanto en aspectos agronómicos como tecnológicos, lo que derivó en un aumento en la definición de requerimientos, y por lo tanto en el alcance del trabajo global. En la Sección 2.4 se observan los requerimientos finales, tanto funcionales, como no funcionales.

## **2.2 Problema Agronómico**

En términos agronómicos, se conoce como disponibilidad u oferta de forraje a la cantidad de forraje o pasto disponible en una determinada área del campo en un momento determinado. Fundamentalmente, los factores que inciden en esta magnitud, medida en Kg MS, son las condiciones climatológicas, así como el tipo de pastura y la época del año en las cuales se realicen las mediciones [16].

Es importante medir la disponibilidad de forraje en un tambo para tomar decisiones sobre manejo y alimentación del rodeo lechero, planificación de forraje, análisis de resultados productivos, etc. La toma de decisiones sobre manejo y alimentación comprende tomar como referencia, entre otras cosas, los datos de disponibilidad de los potreros, para realizar una buena asignación de recursos, es decir, determinar a qué lugar enviar el ganado a alimentarse y por cuanto tiempo. El problema a resolver en este proyecto se centró en estimar la mencionada magnitud como forma de contribuir a las tareas de administración del rodeo lechero. Concretamente, con este trabajo se buscó definir las bases de una o varias metodologías estimación de la cantidad de pastura disponible en cualquier potrero.

Como se mencionó anteriormente, para determinar disponibilidad existen métodos directos e indirectos. Cada uno de estos presentan dificultades en su aplicación en grandes áreas, en algunos aspectos son poco prácticos, requieren tiempo y experiencia y arrojan resultados que no siempre son precisos [17,18]. Estos motivos conducen a situaciones de mala determinación de las zonas adecuadas hacia donde dirigir al rodeo para alimentarse. Esto explica la necesidad de explorar nuevos métodos para lograr una mejor aproximación de esta magnitud para la mejora de la productividad lechera.

Otra de las magnitudes que se plantearon medir desde un primer momento, es la productividad forrajera, la cual a diferencia de la disponibilidad, refiere a la cantidad en Kg MS que se produce en un determinado lapso. En otras palabras, la productividad es una medida estimativa de la cantidad de pastura que habrá de acuerdo a la estimación del crecimiento, mientras que disponibilidad refiere a la cantidad de forraje disponible actualmente, cuya aproximación resulta más compleja.

Uno de los métodos tecnológicos comúnmente aplicados para la determinación de la productividad consiste en obtener un índice conocido como Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) [19,20] a partir de imágenes satélites. Dicho índice puede obtenerse a partir de cálculos matemáticos aplicados sobre la matriz de puntos que conforma cada una de estas imágenes.

El problema de la estimación de la productividad ha sido ampliamente abordado en la literatura existente [21,22,23]. Pueden encontrarse muchos trabajos académicos que aplican algún tipo de tecnología para medir dicha magnitud, por el contrario, existen pocos referentes a disponibilidad [73]. Además, para esta última, no existe un cálculo matemático rápidamente aplicable para su determinación. Las razones presentadas motivan a hacer foco en la disponibilidad.

Los artículos relacionados que aplican tecnologías para medir disponibilidad, frecuentemente se enfocan en determinar la altura y biomasa de cultivos “visibles”

desde el aire, entiéndase canopeo con altura superior a 40 cm, para mejorar la productividad agrícola [22,23,26]. Son escasos los trabajos orientados a los sistemas lecheros. Por estas razones, este trabajo plantea un interesante desafío, ya que las metodologías a utilizar deberán considerar la baja y relativamente homogénea altura que presentará el forraje.

Con este proyecto se abordó una nueva metodología indirecta implementada con un UAV y cámaras digitales que buscaría una mayor precisión que los métodos existentes en la actualidad. Indefectiblemente, este problema estuvo muy relacionado con el tecnológico que se describe en la Sección 2.3. El tipo de dispositivos a utilizar (sensores, etc), así como el diseño del sistema informático debió ser adecuado para obtener la información necesaria de las pasturas que permitiese la resolución del problema agronómico.

## **2.3 Problema tecnológico**

En el contexto tecnológico, en el corto plazo se planteó el abordaje de varias líneas de trabajo. Por un lado, conocer en detalle y de forma mas acertada la temática del problema, lo que significaría investigar acerca del funcionamiento, clasificación y características que poseen los UAV, ya que todos estos vehículos independientemente de su marca y modelo poseen varias similitudes [10]. Se estudiaron los principios generales sobre cómo programarlos y controlarlos, así como la conveniencia en la selección de determinados parámetros de vuelo como velocidad, altura, etc.

Por otro lado, se consideró realizar una selección de los dispositivos de sensado de pasturas, a utilizarse junto con el UAV. Se planteó tomar imágenes georeferenciadas de las pasturas utilizando una o varias cámaras digitales cuyo tipo y características debía ser cuidadosamente seleccionado. Para obtener buenos resultados, debían identificarse aquellos dispositivos que captaran la porción del espectro electromagnético que resulta de interés observar en el estudio de pasturas [27].

Particularmente, se comenzó el desarrollo del proyecto con un dron de la marca 3D Robotics [28] y modelo Iris+ [28,29], aunque el mismo plantea una serie de inconvenientes.

El hecho de que el dron estuviera exclusivamente diseñado para su integración física con modelos de cámara de la marca GoPro [31], llevó a considerar en un primer momento la utilización de una cámara de este tipo. Una GoPro pueden ser controlada remotamente mediante una señal Wifi. Sin embargo, sabiendo que dicha señal genera inconvenientes en el correcto manejo de esta aeronave, se decidió analizar en mayor detalle esta problemática y estudiar la viabilidad de utilizar este u otro tipo de cámara.

Por lo tanto, en este sentido, el problema tecnológico a resolver consistió en seleccionar y lograr la correcta interconexión y comunicación del equipamiento de hardware y del software necesario para llevar adelante el proyecto. En otras palabras, fue fundamental encontrar estrategias que posibilitaran la construcción de un sistema capaz de ejercer control total sobre el dron y la cámara durante los distintos recorridos realizados para lograr coordinación y sincronismo entre ambos dispositivos.

Como característica favorable, este vehículo puede ser controlado remotamente mediante un programa codificado a medida y utilizando plataformas de desarrollo de software libre. La consideración de desarrollar una aplicación desde cero o utilizar herramientas existentes para programar el dron y las cámaras fue otro aspecto estudiado.

Se planteó que debía existir algún tipo de interfaz que permitiese especificar un conjunto de coordenadas (GPS) o rutas a ser seguidas por el vehículo aéreo de forma automática. Este conjunto de coordenadas representarían determinados puntos a estudiar del potrero en cuestión. Específicamente, el dron debía dirigirse y posarse sobre estos puntos para capturar imágenes georeferenciadas de las pasturas u otras mediciones. Cabe aclarar que para este proyecto, no se explicitaron requerimientos sobre como debía ser la interfaz usuario mencionada.

De acuerdo a esto, las soluciones propuestas debían ser coherentes, lo suficientemente genéricas, flexibles, extensibles y adaptables para soportar la utilización del UAV en diferentes recorridos o potreros o la incorporación de nuevos parámetros de vuelos, sensores, etc.

Además de generarse datos útiles para la estimación de disponibilidad, debían estimarse datos estadísticos de los vuelos para determinar entre otras cosas la autonomía necesaria del UAV para realizar los distintos recorridos programados. La autonomía refiere al tiempo de vuelo a partir de las baterías disponibles. Por lo tanto, era necesario determinar mediante evaluación experimental, las configuraciones adecuadas de parámetros de funcionamiento del dron como velocidad, altura, etc. Estos aspectos determinarían los distintos escenarios posibles en los que el sistema puede ser utilizado.

Finalmente, a partir de las imágenes obtenidas, de forma automática y mediante la utilización de software de procesamiento de imágenes y generación de modelos 3D debían elaborarse resultados de estimación de disponibilidad de alimentos.

## **2.4 Requerimientos**

### **2.4.1 Requerimientos Funcionales**

#### **Definición de recorridos a realizar**

La definición de recorridos a realizar por parte del dron consiste en la especificación de un nuevo plan de vuelo a sumarse al conjunto de recorridos programados disponibles para su utilización. De esta manera, los recorridos a ser realizados por el dron estarán estipulados y almacenados en el sistema para su uso posterior en los diferentes vuelos, como se describe en el requerimiento “Vuelo controlado del dron”.

El sistema debe permitir al usuario definir datos básicos del recorrido, como son el número de padrón, la velocidad, la altura y la modalidad de vuelo. El usuario tiene la obligación de suministrar una o varias coordenadas para completar el ingreso del recorrido.

## **Vuelo controlado del dron**

El foco de este proyecto fue lograr que el dron vuele siguiendo una o varias modalidades de vuelo. Por lo tanto, este requerimiento permite que el usuario seleccione un recorrido previamente guardado en el sistema, e ingrese algunos parámetros de la misión como por ejemplo, la resolución a utilizar en las imágenes capturadas por la cámara digital durante el transcurso del vuelo.

Una vez iniciada la misión, el dron debe recorrer los puntos especificados en el recorrido seleccionado, alcanzando determinados puntos relevantes o áreas de interés del terreno para capturar fotos georeferenciadas de las pasturas, las cuales son almacenadas y vinculadas con el recorrido en el sistema. Este requerimiento fue diseñado e implementado para que las imágenes obtenidas se capturen de forma tal que sea posible observar buenos resultados tras el procesamiento de las mismas.

## **Visualización y análisis de resultados**

El sistema tiene que ofrecer una visión inicial de los resultados obtenidos con los distintos vuelos del dron. En primer lugar, se requiere visualizar de forma rápida a las distintas fotos obtenidas de las pasturas, además de otros valores generados durante el procesamiento de las mismas.

Si bien el procesamiento de datos fue una característica opcional, era de interés su implementación para el desarrollo de las metodologías planteadas. A través de ello, será posible estimar la disponibilidad a partir de los datos recolectados con el UAV durante sus vuelos por los potreros.

Este requerimiento facilitará la comparativa de metodologías aplicadas para medir disponibilidad. Concretamente, tras culminar la etapa de experimentación, serán comparados los resultados obtenidos con las metodologías tecnológicas junto a los obtenidos de las técnicas agronómicas de escala visual y del método de corte.

Por otra parte, para cada vuelo, es necesario registrar algunos valores medidos durante su realización como son el tiempo transcurrido, la distancia recorrida y el porcentaje de batería consumido. Esta información posibilitará la generación posterior de estadísticas que determinarán las condiciones de usabilidad del sistema.

### **2.4.2 Requerimientos no funcionales**

Específicamente, el sistema debe ser capaz de lograr el control de un dron cuyo modelo es 3DR Iris+ y de dispositivos de sensado que deben funcionar en conjunto de forma sincronizada. Por lo tanto, se necesita que el diseño de la solución considere todas sus características, incluyendo la autonomía del dron. Esto implicaría una cuidadosa selección para determinar el hardware más adecuado a ser utilizado.

Por otro lado, se requiere que la solución propuesta sea utilizable sobre cualquier potrero, independientemente de su tipo de pastura o de la época del año. El UAV debe ser guiado mediante coordenadas GPS que indiquen la posición de determinados puntos de estudio del campo.

Es necesario que los datos obtenidos durante los distintos vuelos del UAV sean persistidos en una base de datos. Particularmente, interesa almacenar fotografías georeferenciadas de las pasturas en disco, conservando una referencia a la ubicación de los archivos desde los datos persistidos en la base de datos.

De acuerdo al requerimiento de flexibilidad del sistema, este debe permitir la fácil modificación de los parámetros de funcionamiento del dron, como son la altura y la velocidad.

En cuanto a usabilidad, se requiere que el sistema les permita a los usuarios controlar el UAV para sensor pasturas en distintas modalidades de vuelo, sin necesidad de contar con conocimientos o experiencia previa en el manejo manual de estas aeronaves.

## 3 Solución del problema

---

### 3.1 Abordaje de la solución

Para dar solución al problema planteado, se decidió explorar distintas estrategias. Desde el punto de vista tecnológico, en un primer momento se definieron dos modalidades de vuelo a ser utilizadas con el dron, las cuales sin embargo podrán ser extendidas posteriormente.

Para la primera modalidad, la aeronave estará guiada mediante coordenadas que indicarán la posición de determinados puntos de estudio de los potreros. A futuro se indicarán estos puntos para estructurar los recorridos. El propósito de esta modalidad es lograr que el dron capture imágenes georeferenciadas de las pasturas para su posterior análisis. La idea original era procesar estas imágenes directamente o estimar por observación y a juicio de experto la disponibilidad a partir de las fotografías. Debido a que esta área de estudio es muy nueva y no se tiene mucha información al respecto, se decidió buscar una alternativa que facilitara la estimación por observación y el procesamiento de las imágenes a la hora de estimar disponibilidad. Esta alternativa debía ser fácil de implementar y de bajo costo.

Por esta razón, se decidió clavar estacas en el campo para señalar los puntos a ser recorridos, las cuales sirven de regla de medición de las pasturas. Dichos dispositivos tienen una altura de 75 cm, donde 15 cm del total deben estar bajo tierra, y las dimensiones de su base son de 4cm de ancho por 4cm de largo. Están pintadas con color blanco de fondo y con franjas de 5cm de alto y de color azul. Se determinó que 30 estacas son suficientes para cubrir todo un potrero de estudio y que deben ser colocadas en zonas representativas de las pasturas del mismo.

La estrategia a seguir es lograr que el dron capture fotografías donde se visualicen las pasturas que rodean cada estaca. A través de escala visual o de procesamiento de imágenes (mediante algoritmos computacionales) se podrá decidir qué cantidad de marcas aún son visibles de la estaca, para inversamente determinar la cantidad de franjas no visibles. De esta manera, se puede estimar la altura de las pasturas y finalmente con esto la cantidad de biomasa disponible. Por esta razón es importante contar con una buena visualización de las estacas colocadas en el campo a través de fotografías. Por lo tanto, los colores y dimensiones utilizados para las marcas y las estacas fueron estratégicamente seleccionados para favorecer la aplicación de esta metodología. Además, se empleó un algoritmo genético para estructurar la forma de recorrer las estacas, lo cual se explica más adelante. A lo largo de este documento a esta modalidad se la denominará de procesamiento de imágenes.

Como segunda modalidad de vuelo se decidió realizar mapping 3D [6] de las pasturas con el dron. Varias trabajos de investigaciones demuestran que esta técnica es muy utilizada para distintas aplicaciones [24,26,32]. Bajo esta modalidad, el dron deberá volar siguiendo un conjunto de coordenadas en formato de zig zag que estarán especificados en un recorrido, que estará previamente almacenado en el sistema y deberá ser seleccionado por el usuario, tal cual lo especifican los requerimientos funcionales. Durante el vuelo, el dron culminará cubriendo la mayor parte del potrero en cuestión, capturando fotos georeferenciadas de las pasturas

sobre los puntos especificados, las cuales deberán tener un importante solapamiento entre ellas. Para la aplicación de esta técnica es preciso que la cámara este apuntando directamente hacia el suelo durante todos los vuelos.

El propósito de esta técnica es lograr a partir de las imágenes obtenidas la generación de modelos 3D que permitan determinar altura de las pasturas para finalmente deducir la biomasa. A lo largo de este documento a esta metodología se la denominará mapping 3D.

Para poner en funcionamiento estas modalidades cumpliendo con los requerimientos especificados en el problema, en primera instancia se evaluó y seleccionó el equipamiento tecnológico (hardware) adecuado y necesario, incluyendo dispositivos de sensado. Como resultado, se diseñó un módulo de control aéreo a bordo del dron y se decidió utilizar dos tipos distintos de cámaras digitales. Detalles de este proceso así como de la arquitectura física del sistema pueden ser encontrados en la Sección 3.2.

Posteriormente se seleccionaron herramientas de software que permitieran brindarle al usuario opciones de manejo del UAV y de las cámaras. En este sentido, se decidió utilizar y extender la aplicación Tower for Web [54] para adaptarla a las necesidades de este proyecto. Para el desarrollo, se elaboraron modelos a partir del análisis de la realidad del problema.

Para estimar la altura de las pasturas en base a fotos obtenidas en recorridos bajo la modalidad de procesamiento de imágenes, se utilizó una aplicación escrita en Python, específicamente desarrollada por el departamento de Ingeniería Biológica en el marco de este proyecto y para ser usada exclusivamente en este contexto. Cabe aclarar que el alcance de este proyecto no incluyó el desarrollo de esta última aplicación pero si su evaluación. Para la generación de modelos resultantes de la aplicación de la metodología de mapping 3D fueron utilizadas las herramientas ArgiSoft Photoscan [78] y Qgis [79]. Más información acerca de la elección de herramientas y el desarrollo de software puede ser encontrada en las secciones 4.6 y 4.7.

Inicialmente se propuso trabajar sobre praderas sembradas las cuales representan el 60% del área de pastoreo de los tambos. Además, se pretendía realizar los experimentos en primavera por ser la época del año donde se generan mayores crecimientos de las pasturas. A su vez, se consideraba que lo ideal era trabajar con alfalfa porque es la especie que tiene mayor crecimiento en primavera y es ampliamente utilizada en la lechería. Por esta razón, esta época del año fue considerada más propicia para iniciar una aproximación en esta nueva temática para determinar la precisión, exactitud, apreciación y sensibilidad de los sensores y sus mediciones.

Debido a diferentes circunstancias, las primeras evaluaciones experimentales fueron realizadas en verano y en campos naturales, pero se pretende realizar en el futuro más evaluaciones en distintos escenarios (época del año, potreros, etc.). Durante la etapa final del proyecto, fueron comparados resultados generados por los métodos tecnológicos y agronómicos. Estos detalles son presentados en la Sección 5.



## **3.2 Equipamiento utilizado**

Como se mencionó anteriormente, el principal dispositivo utilizado fue un UAV de la marca 3D Robotics. El primer paso fue interiorizarse en el funcionamiento de este dispositivo [30].

Luego, se investigaron las distintas opciones factibles de sensores a ser utilizadas. Se buscaron soluciones que permitieron la construcción de un sistema donde sus componentes fueran compatibles.

### **3.2.1 Elección de un sensor**

Si bien la idea principal del proyecto se centra en el cálculo de disponibilidad de las pasturas, como posible extensión de este trabajo, resulta interesante considerar la incorporación de la medición de otro tipo de magnitudes de las pasturas como la productividad, la cual puede deducirse directamente del índice NDVI. Por esta razón, se buscaron dispositivos de sensado que fueran aplicables a distintas metodologías de abordaje y resolución de los problemas de estimación de la disponibilidad y la productividad.

Los sensores láser, conocidos como LIDAR [24,33] frecuentemente se utilizan a bordo de los drones para obtener datos de altura y así generar modelos 3D [75]. En el desarrollo de este proyecto, no fueron considerados debido al escaso tiempo con el que se cuenta y porque son sistemas costosos, complejos y permiten resolver una menor cantidad de problemas que una cámara. A través de las fotografías aéreas capturas por cámaras digitales es posible obtener muchos resultados más, mediante la realización de distintos tipos de análisis sobre las mismas. Por ejemplo, son útiles para calcular el índice NDVI, el cual es frecuentemente utilizado para estimar la productividad del forraje [21,22,23,25], magnitud que no puede determinarse mediante datos suministrados por un LIDAR. Más importante aún, sin una cámara no sería posible aplicar la metodología de procesamiento de imágenes. Sin embargo, no se descarta la utilización de LIDAR para futuros trabajos.

Por lo expuesto anteriormente, se realizó una investigación para determinar y localizar el tipo de cámara correcto disponible en el mercado que mejor se ajusta a las necesidades de este proyecto. De forma preliminar, se pudo ver que en múltiples trabajos académicos relacionados a la aplicación de tecnologías en el agro, se hace uso de alguna cámara para captar el espectro infrarrojo, ya que esta porción del espectro electromagnético permite observar de mejor forma las distintas propiedades de las pasturas. Por ejemplo la banda infrarroja es necesaria para los cálculos del NDVI.

Para la selección llevada adelante, se tuvo especial consideración en localizar aquellas cámaras más aptas para la aplicación de la metodología mapping 3D con el dron. Esto se debe a que esta propuesta metodológica fue la primera que se consideró como la estrategia más adecuada para la obtención de imágenes georeferenciadas a ser utilizadas en la estimación de disponibilidad. Por esta razón, en la comparativa fueron dejadas de lado las cámaras deportivas como por ejemplo, los modelos de la marca GoPro, debido a su clásica característica de Ojo de Pez

que la hace inadecuada para tareas de mapeo del terreno, como lo describe la documentación oficial del dron utilizado en este proyecto [6].

Para obtener modelos digitales de superficie de alta calidad mediante mapping 3D, se debe de tener en cuenta la relación en metros por pixel de una foto. Esta puede calcularse a partir de los parámetros técnicos de la cámara seleccionada (ej.: resolución) y de la altura de vuelo del UAV. Además, la aplicación de esta técnica exige que la cámara seleccionada apunte directamente hacia abajo mientras el UAV esté en el aire.

Como se anunciaba en la descripción de los problemas, fue de interés tener total control de la cámara para capturar una imagen en una determinada posición GPS, por lo cual se debía de tener una interfaz con dicho dispositivo que permitiese lanzar el evento de capturar una foto en el momento en que la aeronave hubiese alcanzado determinada posición. En primera instancia se planteó controlar la cámara mediante Wifi, no a través de una conexión directa cableada. Sin embargo, se determinó que si el control Wifi de una cámara está activo mientras el dron 3DR iris+ está volando, puede ocurrir un conflicto debido a que las señales de control del dron funcionan en la misma banda del espectro electromagnético que la señal Wifi (2.4GHz). Por esta razón, en cuanto a interfaces de comunicación disponibles con la cámara, se descartó la comunicación por Wifi.

El diseño del dron no dispone de ninguna interfaz propia para conseguir control total sobre ninguna cámara. Esta aeronave basa su controladora de vuelo en una placa Pixhawk [36,37], la cual es de tipo hardware libre, por lo que posee una amplia comunidad detrás que ha generado una basta documentación al respecto. A partir de dicha documentación, se dedujo que efectivamente existe una forma de controlar totalmente una cámara conectada al dron a través de un cable específico, lo que implica además el agregado de componentes al hardware actual del dron. Esta alternativa solo está disponible para un reducido número de modelos de la marca Canon compatibles con CHDK [38]. Las siglas CHDK corresponden a un software que instalado en dichas cámaras permite “hackearlas” para controlar sus funciones de forma programática.

En base a la información presentada previamente, las cámaras candidatas fueron evaluadas considerando varios factores, haciendo especial énfasis en bandas espectrales capturadas, resolución, peso, precio e interfaces de comunicación disponibles con el dron actual. En el mercado se pueden encontrar distintas opciones de cámaras y sensores. Partes de estas fueron descartadas por diferentes motivos, como son la baja resolución, falta de interfaces de comunicación, carencia de especificaciones técnicas u otras razones que las hacen técnicamente inadecuadas para este proyecto.

Cabe aclarar que en la mayoría de los trabajos de investigación consultados, se menciona el uso de una cámara “Canon S110” para las actividades de mapping 3D [26,32]. Por otro lado, una de las opciones para cámaras infrarrojas a ser consideradas fue Raspberry PI Camera [39]. A diferencia de las cámaras comerciales, esta última fue específicamente diseñada para aplicaciones tecnológicas y es utilizada en distintos proyectos de investigación y/o científicos. En comparación con otras cámaras existentes en el mercado, la Raspberry PI Camera

es más liviana y accesible. Está disponible en los formatos color, RGB e infrarrojo, NGB [40]. Como contrapartida, tiene una resolución de 8 megapíxeles (MP) y necesita estar conectada con una minicomputadora Raspberry PI [41] para funcionar. En la Tabla 1 se observan las opciones que fueron preseleccionadas junto a datos de interés.

| Nombre                   | Bandas         | Precio (USD) | Resolución (MP) |
|--------------------------|----------------|--------------|-----------------|
| Canon S110               | NIR o RE o RGB | 460          | 12              |
| ProGo-G-R-NIR            | G+R+NIR        | 675          | 12              |
| Canon EIPH 130           | B+G+NIR        | 775          | 16              |
| Tetracam ADC Micro       | R+G+NIR        | 3000         | 2               |
| ProGo-B-G-NIR            | B+G+NIR        | 575          | 12              |
| Pi NoIR v2 (Sony IMX219) | RGB o NGB      | 25           | 8               |

Tabla 1: Listado de cámaras preseleccionadas.  
Referencias:

- Nombre: modelo de la cámara.
- Bandas: bandas espectrales en las que opera el dispositivo, cuya referencia es la siguiente:
  - R: rojo (Red)
  - B: azul (Blue)
  - G: verde (Green)
  - RGB: espectro visible por el ojo humano.
  - NIR: infrarrojo cercano (Near Infrared)
  - RE: borde rojo del espectro visible (Red Edge)
  - NGB: infrarrojo cercano, verde y azul.
- Precio: valor del dispositivo, expresado en dolares estadounidenses (USD)
- Resolución: resolución de la cámara en megapíxeles (MP).

A partir de las diferentes alternativas presentadas, se resolvió que la mejor opción sería utilizar una Raspberry PI Camera debido a su precio y su compatibilidad con este proyecto. Se planteó que para esta etapa de investigación, donde existía mucho desconocimiento del tema, era conveniente utilizar este dispositivo para obtener los primeros resultados, a pesar de su baja resolución. En el futuro, tras la evaluación positiva de resultados, podrían adquirirse nuevos sensores de mayores capacidades. Junto con esta elección, se estudiaron los costos y beneficios de contar con una minicomputadora conectada al dron. Cabe aclarar que la viabilidad de esta solución fue estudiada, confirmándose dicha posibilidad. La fundamentación de ello se describe en la Sección 3.2.2.

Por otra parte, la cámaras de tipo multiespectral [34], como la “Tetracam ADC Micro”, fueron descartadas debido a la baja resolución espacial que poseen, así como a sus muy altos precios [35]. Por su parte, las cámaras comerciales se descartaron para esta etapa inicial de investigación, debido en parte a su altos costos y a no considerarse apropiadas para esta actividad, porque poseen múltiples utilidades orientados al usuario final, como por ejemplo una pantalla o display, que no son necesarias o no recibirían uso para este proyecto. Todas estas cámaras tienen un costo extra si se compran modificadas con los filtros adecuados para captar la banda infrarroja, aunque también es posible comprar los filtros y hacer las modificaciones

de forma manual. En cambio, se puede adquirir una cámara para Raspberry PI del tipo NGB, con el filtro aplicado, sin costos extra respecto a su versión a color.

Por lo tanto, la elección definitiva fue adquirir 2 cámaras del tipo Raspberry PI Camera en sus dos versiones dados los reducidos costos de su compra.

### **3.2.2 Computadora complementaria**

Con el estudio de la documentación disponible sobre el software y hardware que forma parte del dron a ser utilizado, se descubrió la posibilidad de incorporar una segunda computadora del tipo Raspberry PI al dron. Esta es capaz de comunicarse con la placa controladora de la aeronave, Pixhawk, utilizando el protocolo MAVLink [42]. A su vez, con una Raspberry PI es posible construir un hotspot Wifi. Este esquema de componentes posibilitaría el envío de instrucciones al dron de forma indirecta desde cualquier dispositivo con soporte Wifi. Para lograr esto con el dron 3DR Iris+ es necesario tomar las precauciones de desactivar el receptor de radio de 2.4 Mhz para evitar conflictos como el relatado en los problemas tecnológicos entre dicho aeronave y una cámara GoPro.

La utilización de esta minicomputadora no estuvo motivada únicamente para facilitar la integración de Raspberry PI Camera al sistema. Si bien su incorporación implica un importante trabajo de integración, por otro lado posibilita el cumplimiento de varios de los requerimientos planteados en este proyecto, además de acarrear varios beneficios extra, los cuales se describen a continuación.

En cuanto a requerimientos, este dispositivo garantiza la definición de un único punto de acceso a un sistema unificado de control tanto de la cámara como del dron, evitando posibles conflictos entre dispositivos como los mencionados. Al contar con un dispositivo inteligente a bordo con su propio sistema operativo Linux [43], las posibilidades de programación y automatización de procesos se incrementan. Por esta razón, es posible ejecutar una aplicación en el dispositivo que mientras comande al dron y a las cámaras de forma sincronizada, ofrezca una interfaz web para el acceso y control de los usuarios desde cualquier plataforma, ya sea, notebooks, tablets, celulares, etc. Cabe aclarar que esto representa una ventaja al diseño por defecto del dron que no dispone de ninguna interfaz propia para conseguir control total sobre ninguna cámara. Intentar resolver el requerimiento de comandar el dron y una cámara sin utilizar este dispositivo, implicaría la puesta en marcha de dos aplicaciones independientes, uno de control del dron y otro de la cámara, para finalmente poner en funcionamiento una tercera interfaz de comunicación entre ambas. La implementación de lo descrito con la aeronave disponible sería complejo y necesitaría de la incorporación de hardware complementario.

Existen beneficios potenciales para el uso de este tipo de computadora complementaria. En particular esta arquitectura facilita la extensibilidad del sistema y/o el acoplamiento de nuevos sensores al dron, como por ejemplo un LIDAR u otra cámara digital, para permitir la realización futura de otro tipo de mediciones sobre los potreros para así ampliar los resultados obtenidos. Por otro lado, se debe considerar que el dron no puede alejarse más de 1 km de su estación de control para que el enlace no se pierda cuando la comunicación entre las partes se establece de

manera inalámbrica, en cambio utilizando una minicomputadora el enlace nunca se rompería, debido a que el dron y su estación de control permanecerían siempre juntos.

Por otro lado, este dispositivo inteligente posibilita el procesamiento de datos en tiempo real durante el vuelo del dron. Esto significa, que se pueden llevar a cabo tareas como reconocimiento de imágenes, las cuales no pueden ser realizadas por un Pixhawk debido a sus limitadas capacidades de memoria para almacenar imágenes. Esta fue una de las principales características que despertó interés en su utilización, ya que desde el propio UAV, permitiría la ejecución de algoritmos de procesamiento de imágenes para caracterizar una foto en función de cuán cubierta por las pasturas se encontrara la estaca en cuestión.

Otras tareas factibles a realizarse en tiempo real podrían ser la transferencia de fotos georeferenciadas o video directamente desde el dron a una interfaz de control del usuario o a un servidor externo, posiblemente localizado en Internet, o la aplicación de técnicas de detección y abolición de obstáculos como por ejemplo, árboles, torres de electricidad, etc.

Por último y no menos importante, considerando la puesta en funcionamiento de una aplicación web en dicho dispositivo, se obtiene el beneficio de la portabilidad del sistema, ya que los usuarios no tendrían requerimientos de instalación de software extra para hacer uso de esta desde sus ordenadores; simplemente deberían acceder a esta desde cualquier navegador actualizado, utilizando cualquier dispositivo electrónico con soporte a conexión wifi, como por ejemplo, notebooks, pcs, tablets, celulares, etc. Se evitaría el uso de elementos externos para la comunicación con el dron, como antenas de telemetría [44] para notebooks y celulares, o controles remotos (utilizados en comunicaciones estándar).

### **3.2.3 Arquitectura física del sistema**

Para lograr el acoplamiento de una cámara específica con el dron, además de considerar la utilización de una computadora complementaria, fue necesario diseñar y desarrollar un módulo compuesto por los distintos dispositivos a ser incorporados al dron, junto a los medios de conexión necesarios para interconectarlos. A lo largo de este documento, a este se lo denominará módulo de control aéreo. Este módulo comprende los dispositivos y componentes electrónicos que se listan a continuación:

- una computadora complementaria (mini-computadora Raspberry PI),
- una Raspberry PI Camera<sup>1</sup>,
- un banco de poder externo,
- y cables USB para alimentar la Raspberry PI

Se desarrollaron diferentes versiones del módulo de control aéreo, las cuales fueron implementadas y perfeccionadas con el fin de lograr la mejor interconexión del conjunto de componentes individuales presentados anteriormente.

Cabe recordar que en esta configuración, la cámara y el dron no dialogan mutuamente. La encargada de funcionar como intermediario es la computadora

---

<sup>1</sup> Para la primera versión del módulo aún no se disponía de la cámara digital.

complementaria, en la cual se colocó una aplicación encargada de enviar señales de control a ambos dispositivos. Dicho sistema coordinara acciones como despegue, avance y aterrizaje del dron en el momento oportuno o captura de fotografías para una determinada posición GPS. Discusiones relativas al software a utilizar son presentadas en la Sección 3.5 del presente documento.

El controlador de vuelo de este dron, Pixhawk, puede comunicarse con la Raspberry PI a través del protocolo MavLink. Para establecer dicha conexión existen dos alternativas posibles, una asociada a una comunicación inalámbrica mediante señales de telemetría en el rango de los 915 Mhz [90] y otra asociada a una comunicación directa serial y cableada [45].

Por su parte, las cámaras son conectadas mediante un cable al puerto CSI de la Raspberry PI. El intercambio entre la cámara a color e infrarroja debe hacerse de forma manual debido a que existe un único puerto en la mincomputadora destinado a este fin. Cabe aclarar que por motivos de aplicar la técnica de mapping 3D y facilitar el diseño del módulo de control aéreo, se decidió que la cámara esté ubicada en una posición fija en dicho contenedor de forma tal que su lente siempre apunte directamente hacia abajo.

La mincomputadora funciona como un Wireless Hotspot [46] posibilitando el acceso al sistema a los dispositivos móviles (con soporte Wifi) a partir de los cuales el usuario puede tener control sobre el dron y la cámara. Para facilitar la comprensión de lo expresado, se presenta en la Figura 1 un esquema de distribución de componentes aplicable a cada una de las distintas versiones. En efecto, cada una de ellas es una implementación específica de dicho diseño.

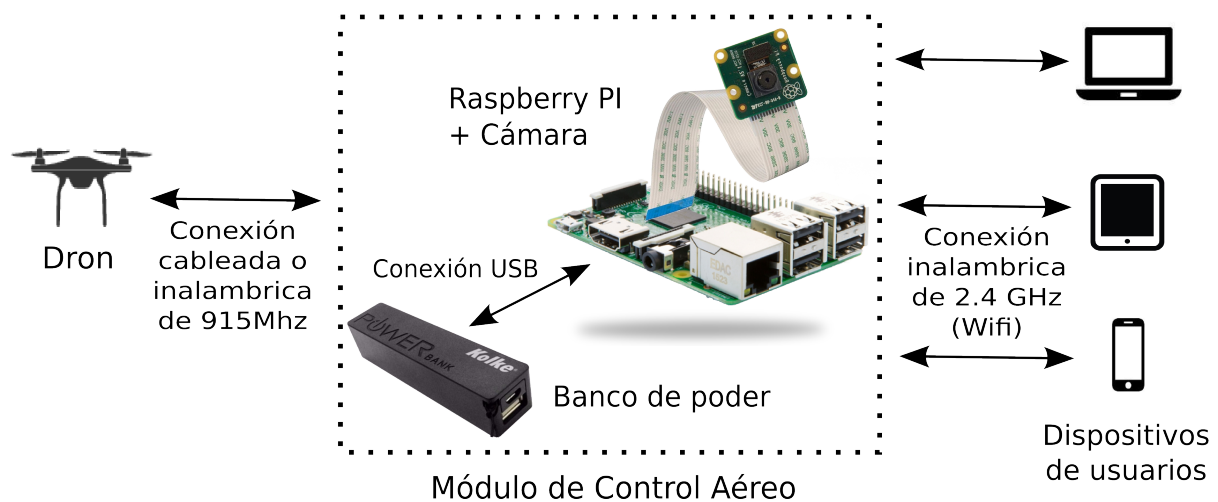


Figura 1: Esquema de distribución de componentes en el módulo de control aéreo.

Cabe recalcar, que dicho esquema representa la arquitectura física que ha sido seleccionada en ese proyecto para la construcción del sistema de comunicaciones. A su vez, toda aplicación alojada en la mincomputadora debe tener una arquitectura cliente/servidor para permitir a los usuarios interactuar con ésta a través de una interfaz adecuada, de forma directa y comunicándose remotamente desde sus dispositivos electrónicos.

Para incorporar y sujetar el módulo de control aéreo al dron y protegerlo de condiciones ambientales (viento, polvo, etc) se planteó utilizar una caja contenedora. Esta sería utilizada para ubicar el módulo de control aéreo en su interior. Se desarrollaron varias versiones de la misma con el motivo de mejorar la autonomía del dron.

### **Versiones del módulo de control aéreo**

Esta sección comprende los aspectos del hardware utilizado para la construcción de las distintas versiones del módulo de control aéreo.

Para la primera iteración del ciclo iterativo del desarrollo de este módulo, se optó por medios inalámbricos para simplificar las tareas de interconexión de los componentes, buscando una primera solución simple y funcional a este problema. Dicha conexión se implementó mediante una antena de telemetría conectada por cable USB a la minicomputadora. Cabe aclarar que para esta etapa inicial de desarrollo se contaba con una Raspberry PI 1, la cual no tiene integrado soporte Wifi, por lo que fue necesario conectarle a esta un adaptador USB Nano para posibilitar las conexiones Wifi. Para esta versión, no se utilizó una cámara, debido a que aún no se contaba con ninguna.

Esta primera versión no funcionó como se esperaba ya que se constataron retardos e inconvenientes en las comunicaciones entre esta y el dron. Investigaciones y pruebas permitieron determinar que estos problemas ocurrían por interferencias entre las antenas de telemetría pertenecientes al dron y al módulo de control aéreo, las cuales se encontraban muy próximas.

Debido a estos problemas, se buscó una nueva solución que mejorase las comunicaciones. Se propuso comunicar el dron y la Raspberry PI de forma cableada para evitar los inconvenientes detectados así como todos los posibles problemas que padecen las comunicaciones inalámbricas como interferencias con otras señales de radio o electromagnéticas (redes Wifi cercanas, etc). Por lo tanto, se adquirió algunos cables jumpers [48] para lograr las interconexiones necesarias y así implementar la versión 2 del módulo de control aéreo, la cual incluyó la cámara a color.

Gracias a las mejoras realizadas, se obtuvieron mejores resultados durante los vuelos del dron. Particularmente, se logró que la aeronave responda inmediatamente cuando el usuario le indica un comando de vuelo. Cabe aclarar que esta versión fue empleada para realizar las primeras secuencias de pruebas, a partir de las cuales se realizaron ajustes en los mecanismos de control del dron.

Con el fin de incrementar las capacidades de cómputo del módulo de control aéreo, se desarrolló una versión de este (número 3), utilizando una Raspberry PI 3, recientemente adquirida. Para construir esta versión, se aplicaron todos los conocimientos y experiencias adquiridas hasta el momento sobre comunicaciones entre el dron y la minicomputadora. El estuche o “Raspberry PI Case” con el provino dicha minicomputadora, contenía un soporte para Raspberry PI Camera. Esto permitió que desde el módulo de control aéreo pudiera fijarse la correcta posición de la cámara, sin necesidad de apoyo extra. La Raspberry PI 3 cuenta con mayores

capacidades de procesamiento y memoria que la Raspberry PI 1, además de incluir soporte Wifi por defecto. Esto permitió una mayor rapidez en la ejecución de procesos desde la minicomputadora.

Cabe aclarar, que esta versión fue utilizada para realizar recorridos programados tanto con la cámara a color, como con la infrarroja. Además, se utilizó para pasar a producción el sistema de control del dron, una vez que este alcanzó una etapa avanzada de desarrollo.

### **Versiones de la caja contenedora**

La autonomía es uno de los aspectos fundamentales a tener en cuenta cuando se opera con un dron, ya que determina el tiempo máximo que podrá mantenerse volando. La autonomía depende en gran medida del peso de carga útil o extra que viaja junto al dron. Cuanto más pesada sea esta carga, menos tiempo durará su batería. Específicamente, para el dron seleccionado, su tiempo de vuelo con carga útil incluida se estima en 15 minutos y la carga máxima que puede soportar es de 400 gr. Cabe aclarar que entre todos los componentes a ser incorporados al dron, el que representa mayor peso es la caja contenedora. Por lo tanto, con el fin de mejorar la autonomía del dron, se destinaron esfuerzos en desarrollar distintas versiones de caja contenedora teniendo en cuenta los aspectos descritos anteriormente, sin perder de vista que su objetivo principal es servir de receptáculo al modulo de control aéreo, protegiéndolo de las condiciones climatológicas como viento, polvo, etc.

Para la primera versión de la caja contenedora, se adquirió una caja estanca o de conexiones eléctricas, las cuales son comúnmente utilizadas para realizar instalaciones de este tipo en hogares o exteriores. En la Figura 2 se presentan imágenes de esta.



Figura 2: Versión 1 de la caja contenedora.

Esta primera versión, aún pesando menos que el límite máximo soportado resultó ser una carga costosa de trasladar por la aeronave. Esto se comprobó experimentalmente al notar el esfuerzo que requería el dron para mantenerse en el aire, lo cual directamente se relaciona con los consumos de batería registrados.



Por esta razón, para lograr la disminución del peso de la carga útil, se decidió buscar otros tipos de cajas contenedoras mas livianas. En el mercado, se pueden encontrar recipientes o envases compuestos por distintos tipos de materiales. En particular, los envases ligeros se caracterizan por estar contruidos con materiales de baja densidad, o sea, son aquellos que tienen un peso reducido en relación al volumen que ocupan [47]. El plástico es uno de ellos. Este material es resistente a condiciones climatológicas y muy liviano, su densidad promedio es de 0,91 g/cm<sup>3</sup>. Debido a que este cumplía con lo que se buscaba, se investigaron cuáles tipos de plásticos eran los mas convenientes para diseñar la caja contenedora. Por lo tanto, se evaluaron varios tipos de este material, comparando su densidad junto a la del aluminio; dichos valores se listan en la Tabla 2.

| Material                     | Densidad (g/cm <sup>3</sup> ) |
|------------------------------|-------------------------------|
| Aluminio                     | 2,7                           |
| Acrílico                     | 1,18                          |
| Polietileno                  | 0,93 (promedio)               |
| Polipropileno Amorfo         | 0,85                          |
| Polipropileno Semicristalino | 0,95                          |

Tabla 2: Densidad de tipos de plástico evaluados.

De acuerdo a esto, se dedujo que una de las categorías de plásticos mas livianos es el Polietileno el cual puede ser localizado más comúnmente en recipientes domésticos como los tupper. Por lo tanto, se adquirió un tupper para implementar la versión 2 de la caja contenedora. Una imagen de la misma se presenta en la Figura 3.

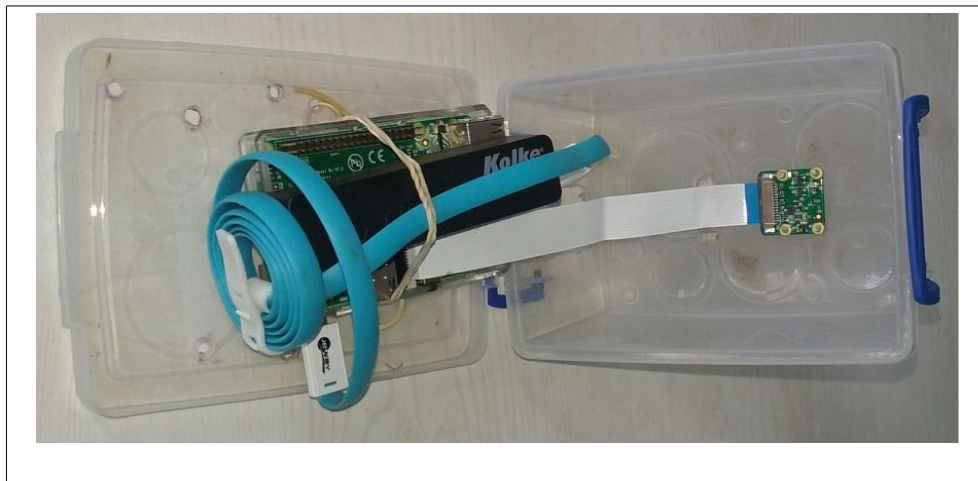




Figura 3: Versión 2 de la caja contenedora.

Se pudo verificar que con el empleo de esta nueva caja contenedora, se redujeron los esfuerzos necesarios del dron para mantenerse en el aire, lo cual se vio reflejado en la autonomía de la aeronave.

Para la versión 3 del módulo de control aéreo, fue necesario diseñar una nueva caja contenedora (versión 3) que se adecuara a sus dimensiones. Cabe aclarar que las versiones anteriores de cajas contenedoras debieron ser modificadas para permitir la correcta ubicación de la cámara en una posición fija. Esto no fue necesario para este caso, ya que el módulo de control aéreo correspondiente contaba con su propio soporte para la cámara. Esto permitió un diseño más simple de la caja contenedora respecto a la versión anterior. Para su construcción se utilizó otro tupper, 10 gr mas liviano que el empleado en la versión anterior, buscando mejorar la autonomía del dron. Una imagen del mismo se presenta en la Figura 4.



Figura 4: Versión 3 de la caja contenedora.

Al estudiar el funcionamiento de las cajas contenedoras empleadas hasta el momento, se pudo notar que su rendimiento no era bueno debido a que no tenían un diseño aerodinámico que favoreciera el desplazamiento del dron en el aire. Debido a esto, se coordinó junto al HackLab Paysandú [93] la creación mediante una impresora 3D de una nueva caja contenedora (versión 4) con el dimensionamiento adecuado de todas sus partes. Una imagen de esta y del módulo de control aéreo ubicado en su interior, puede ser observada en la Figura 5.



Figura 5: Versión 4 de la caja contenedora.

Los tiempos obtenidos, al utilizar esta cuarta versión de la caja contenedora para los recorridos del dron, demuestran mejoras en la aerodinámica. Sin embargo, el consumo de batería no mejoró debido a que el peso de la misma fue superior al de las versiones anteriores, en las cuales se utilizó el material polietileno. Una comparativa de los tiempos y niveles de batería consumidos por distintos vuelos se detalla en la Sección 5.3. La diferencia de peso radica en parte en el material utilizado por la impresora 3D, el cual es PLA o ácido poliláctico. Este material tiene una densidad mayor a la del polietileno. Por otro lado, las paredes de la caja son de 4 mm de grosor lo que las hace muy gruesas. Sin embargo, este diseño se puede mejorar y por lo tanto el peso de la caja disminuiría.

De todas maneras, se tomó la decisión de utilizar la caja impresa para completar la última parte de este proyecto, por tener un diseño mas flexible que facilita enormemente la operativa sobre el módulo de control aéreo. Por ejemplo, este esquema simplificó el intercambio de cámaras, evitando el reemplazo del módulo de control aéreo completo para conseguir la captura de fotos con una cámara distinta.

Para concluir con la descripción de las distintas versiones de la caja contenedora, se presenta en la Tabla 3 una comparativa de los pesos de todas ellas.

| Versión | Peso (gr) |
|---------|-----------|
| 1       | 320       |
| 2       | 225       |
| 3       | 215       |
| 4       | 270       |

Tabla 3: Pesos de las distintas versiones del módulo de control aéreo.

Con toda la experiencia adquirida hasta el momento, no se descarta la posibilidad de imprimir una nueva caja contenedora más liviana en otra oportunidad, para mantener la aerodinámica y para volver a mejores niveles de consumo de batería. En el futuro, teniendo acceso a otro impresora 3D mas evolucionada, se podrían imprimir objetos utilizando otros materiales mas livianos.

### **3.3 Construcción de estacas**

Las estacas básicamente son reglas graduadas de medición de las pasturas. Estas fueron diseñadas de forma tal de facilitar la aplicación de las metodologías de procesamiento de imágenes y las estimaciones visuales de disponibilidad realizadas por parte de expertos en el tema. Para que no existieran inconsistencias en las mediciones realizadas para distintos puntos, todas debían ser de la misma altura. Se definió que cada estaca debía estar enterrada al menos 15 cm por debajo de la tierra para mantenerse estable y no caerse producto del impacto con animales o inclemencias del tiempo. Para que estos dispositivos permitiesen la aplicación de esta metodología frente a distintos escenarios, se les dio una altura de 60 cm por encima del nivel del suelo ya que las pasturas de los potreros sobre los que interesa medir disponibilidad no superaban dicha altura. Por lo tanto, todas las estacas fueron construidas de 75 cm de alto.

Debido a que las estacas funcionarían como reglas, debían contar con marcas, franjas o graduaciones predefinidas cada determinados intervalos. A los efectos del procesamiento de imágenes, se consideró necesario lograr el suficiente contraste entres las estacas y sus marcas. Por lo tanto, se decidió pintar las estacas empleando dos colores distintos, uno para su fondo y otro para sus marcas. A su vez los colores utilizados no deberían estar presentes en las pasturas para poder lograr distinguir la estaca durante el mencionado procesamiento. Para el fondo de las estacas se decidió utilizar blanco, debido a que es el color que mas refleja la luz del sol, no está comúnmente presente en las pasturas y por lo tanto permite que las estacas resalten en las fotografías. Para las marcas, se optó por utilizar un color azul



brillante ya que contrasta con el blanco y el verde y es uno de los que más resalta en fotografías tanto RGB como NGB capturadas con Raspberry PI Camera [81].

Además, para que las marcas de las estacas fuesen fácilmente detectables por los algoritmos de procesamiento, debían tener una determinada altura y separación entre ellas que permitiese distinguirlas en las fotos, dada la resolución de la cámara seleccionada. Teniendo en cuenta la resolución máxima de la cámara y a partir de cálculos detallados en 4.4, se determinó que un elemento con una altura entorno a los 5 cm es claramente distinguible en una fotografía. Por esta razón, se decidió destinar 5cm para la altura y la separación entre las franjas. De esta manera, toda estaca tendría 6 marcas que permitirían diferenciar 6 niveles distintos de altura. Con este diseño se pretendía abarcar un amplio abanico de alturas de las pasturas.

Para verificar la viabilidad de este planteamiento, se decidió realizar un prototipo de estaca con una base de 4cm de ancho por 4cm de largo utilizando todas las especificaciones detalladas. Una vez construida, se clavó en un área de prueba como se muestra en la Figura 6. A la misma se le tomaron fotografías con la cámara seleccionada desde una altura entorno a los 3 m. A continuación estas fueron procesadas, y se comprobó que los colores y dimensiones definidas eran adecuadas para el procesamiento de imágenes. También se comprobó que para el ojo humano, las franjas son claramente visibles a una distancia en un rango de 3 o 5 metros.



Figura 6: Estaca clavada en un área de prueba.

La estrategia seguida para estimar la altura de las pasturas mediante esta metodología, fue procesar las fotos para contar el número de franjas visibles por cada estaca. Para cada estaca, conociendo este valor, se puede determinar la cantidad de franjas no visibles, las cuales se encuentran tapadas por las pasturas que rodean a dicha estaca. Conociendo la altura visible de las estacas por encima del nivel del suelo, la altura de cada franja, así como de las separaciones entre estas es posible estimar la altura de las pasturas entorno a las estacas.

### 3.4 Modelos matemáticos

Se definieron algunos modelos matemáticos para ser aplicados en el posicionamiento del dron frente a sus diferentes modalidades de vuelo, ya que de esto depende la obtención de buenas imágenes georeferenciadas. A partir de las distintas características de la cámara, se dedujeron fórmulas que determinaron la correcta posición del dron, en cuanto a latitud, longitud y altitud para tomar una foto.

#### 3.4.1 Modelo para capturar fotos a procesarse

Como se anunció en secciones anteriores, la cámara seleccionada para este proyecto es Raspberry PI Camera, la cual posee una serie de especificaciones técnicas documentadas [39]. Cabe aclarar además, que para todas las metodologías, el dron vuela hacia adelante y la cámara toma fotos de la misma forma debido a que mantiene una posición fija en el módulo de control aéreo.

Toda cámara tiene un campo de visión o field of view (FOV) compuesto por ángulos que determinan los límites de la escena de la realidad que será capturada por este dispositivo. Para la cámara seleccionada, estos ángulos son de  $62.2^\circ$  y  $48.8^\circ$ , valores a los cuales se referirá de aquí en más en este documento como *anguloFAncho* y *anguloFLargo*, respectivamente.

Debido a que para la aplicación de mapping 3D se decidió mantener la cámara apuntando directamente hacia abajo, surgió la necesidad de analizar en qué ubicación debe estar el dron al momento de tomar las fotos durante la aplicación de la modalidad de procesamiento de imágenes para lograr la correcta captura de las estacas, así como de las pasturas que las rodean. Concretamente, las estacas deben visualizarse en las fotografiadas de forma tal que resulten útiles como regla de referencia para estimar la altura de las pasturas que las rodean.

Para garantizar la obtención de una foto útil desde una cámara en la posición descrita (apuntando directamente hacia abajo), la misma no debe ser tomada a mucha distancia de la estaca, de lo contrario ésta no sería visible, tampoco directamente sobre la misma, ya que solo sería captada su cara superior, resultando inútil la imagen para estimar la altura de las pasturas. Por lo tanto se debió calcular el mejor punto intermedio entre ambas condiciones teniendo en cuenta no solo el ángulo de visión de la cámara, sino también las alturas de vuelo dron y de las estacas.

Para los parámetros de la cámara seleccionada, el campo de visión de la misma puede ser representado como una pirámide, como se observa en la Figura 7. La mejor ubicación para capturar las fotos es donde la cámara visualiza a la estaca de forma “más inclinada”. Esta mejor visualización se consigue cuando la estaca está próxima a una de las paredes laterales de la pirámide. Lo expresado se representa gráficamente en la mencionada figura, donde la estaca se indica con un segmento de línea sólido y grueso.

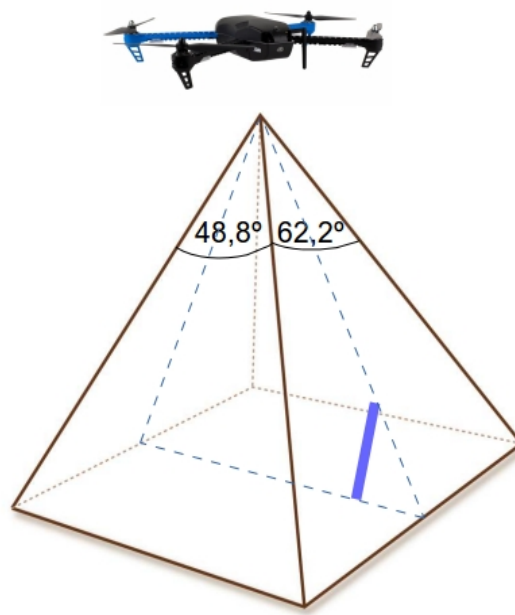


Figura 7: Campo de visión de Raspberry PI Camera.

Básicamente, teniendo en cuenta que el dron vuela siempre hacia adelante, la estrategia seleccionada fue indicar a la cámara que tome la fotografía cuando la estaca se sitúe en un extremo respecto del largo de la escena capturada. De acuerdo a esto, la posición en la que debe estar la estaca al momento de tomar la foto se visualiza de forma mas clara en la Figura 8. En esta se aprecia una vista ampliada del triángulo de línea punteada presentado en la Figura 7.

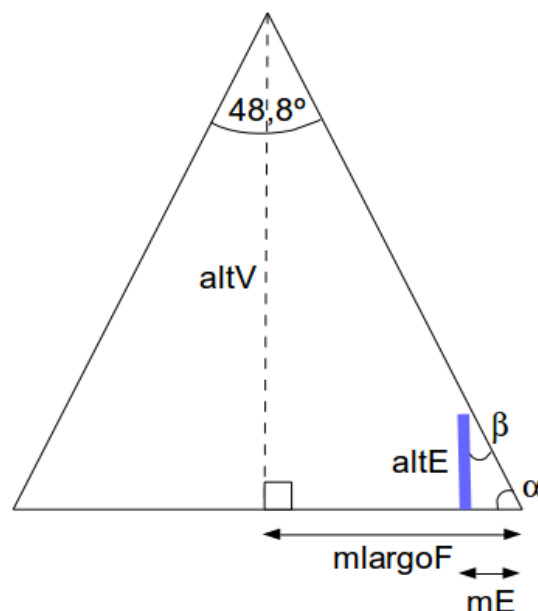


Figura 8: Ubicación favorable para cada estaca respecto del campo de visión de la cámara seleccionada.

En este esquema,  $altV$  corresponde a la altitud de vuelo aproximada que el usuario solicite que el dron alcance en determinado momento, por lo que matemáticamente hablando será una variable independiente. La altura de la estaca  $altE$  es fija y conocida ya que todas ellas tendrán la misma altura de 60 cm visible por encima de nivel del suelo.

Para lograr posicionar el dron en el vértice superior de este triángulo, conociendo estos datos se deben determinar las incógnitas  $mE$  y  $mlargoF$ . La incógnita  $mE$  representa el margen existente entre la estaca y el límite de la escena, mientras que  $mlargoF$  indica la mitad del largo de la foto. Una vez conocidos estos valores, debe determinarse la distancia ideal respecto de la posición de la estaca en la cual debe estar ubicado la aeronave para tomar imágenes más útiles. Dicha distancia ( $DistE$ ) es calculada mediante la diferencia de los valores mencionados.

Para resolver este problema pueden aplicarse reglas de trigonometría. Teniendo en cuenta el componente  $anguloFLargo$  del campo de visión de la cámara, fácilmente es posible determinar  $\beta$ . A partir de este ángulo, se puede determinar  $\alpha$ . Con estos, datos se pueden calcular las distancias  $mE$  y  $largoF$  por separado para luego determinar  $DistE$ . A continuación, se detalla el cálculo descripto.

Primero es necesario determinar el ángulo  $\alpha$ :

$$\beta = anguloFLargo/2 = 48,8^\circ/2 = 24,4^\circ$$

$$\alpha = 90 - \beta = 65,6^\circ$$

Luego se calcula  $mE$ :

$$\tan \alpha = altE/mE$$

$$mE = altE / \tan \alpha = 0,27 \text{ m}$$

Respecto a la altura de vuelo solicitada  $altV$ , se pudo comprobar que el dron logra aproximarse a ésta en un rango aceptable de  $\pm 0.5$  m respecto de lo estipulado. Por lo tanto, se resolvió tener en cuenta este error en los cálculos y en todos los casos, considerar la altura inferior de este rango. Además como dicho valor es medido respecto a la posición del dron y la cámara está acoplada en la parte inferior de este, se debe ajustar dicha medida, decrementándola en la distancia existente entre la cámara y el centro del dron.

De todo esto se deduce que la altura real,  $altR$  a considerar es:

$$altR = altV - 0,5 - 0,2$$

A partir de este resultado, se puede calcular  $mlargoF$  de esta manera:

$$mlargoF = altR / \tan \alpha$$

Finalmente  $DistE$  se calcula así:

$$DistE = mlargoF - mE.$$



### 3.4.2 Modelo de recorridos para procesamiento de imágenes

En esta sección se presenta cómo se estructuraron los recorridos a ser realizados por el dron para la metodología de procesamiento de imágenes. En primer lugar, cabe aclarar que no es de interés tomar fotografías sobre la totalidad de los puntos que visitará el dron durante sus recorridos por los potreros. Por dicha razón, se distinguirán dos categorías de puntos. Las ubicaciones sobre las cuales interesa obtener imágenes de las estacas para su estudio posterior se denominarán puntos estacas, mientras que las restantes, puntos comunes. Un ejemplo de la categoría mencionada en segundo lugar es el punto de partida/regreso de los distintos recorridos.

Básicamente, la estrategia inicial elegida para estos recorridos consiste en tomar tres fotografías para una misma estaca en el siguiente orden, una inmediatamente antes de llegar a la estaca, otra sobre la estaca y otra después de la misma. La ubicación en la cual se tomará la fotografía exactamente sobre la estaca, distará el valor *DistE* (en metros) calculado en la Sección 3.4.1, de cada una de las restantes dos posiciones.

Mayormente se evitaron cambios bruscos de dirección en el movimiento del dron que enlentecieran su re posicionamiento. Para esto, para cada par de puntos, se utilizó como eje de movimiento entre estos la recta formada por ambos. Hipotéticamente, si el dron realizara un recorrido a 5m de altura, la distancia ideal de proximidad para capturar la foto de una estaca sería de 1.68 m. Por lo tanto, si el recorrido estuviera formado por dos puntos estacas denominados 1 y 2 de coordenadas relativas (0,5) y (5,0) respectivamente y un punto común (0,0), las rectas  $x = 5$ ,  $y = 5$ ,  $y = -x + 5$  serían los ejes de desplazamiento de la aeronave. Particularmente, los puntos en los que interesa tomar fotografías para este ejemplo serían,

- para la estaca 1:
  - f1: (0,3.55)
  - f2: (0,5)
  - f3: (1.19,3.81)
- para la estaca 2:
  - f4: (3.81,1.19)
  - f5: (5,0)
  - f6: (3.55,0).

Lo descripto anteriormente, así como los puntos generados se presentan gráficamente en la Figura 9.

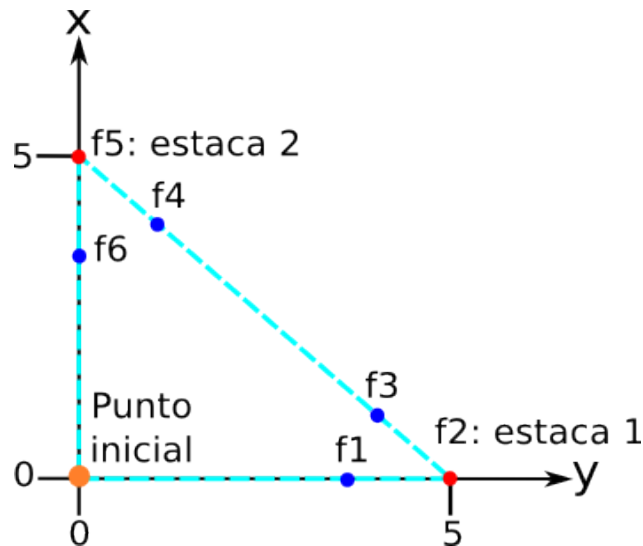


Figura 9: Estrategia de movimiento del UAV para un recorrido con 2 puntos estaca.

### 3.4.3 Modelo de recorridos para mapping 3D

El modelo propuesto en la Sección 3.4.1 puede aplicarse de manera similar a la modalidad de vuelos de mapping 3D. Sin embargo, en este caso para los cálculos deben utilizarse ambos ángulos componentes del campo de visión.

Cabe recordar que con esta técnica se pretende cubrir la mayor parte del potrero o área de estudio en cuestión, generando imágenes georeferenciadas de las pasturas que tengan un cierto solapamiento entre ellas que posibilite su utilización para generar modelos 3D que reconstruyan las pasturas. Cabe aclarar que la superposición de fotos es necesaria para que el software apropiado entienda como hacer coincidir las imágenes para generar los mencionados modelos.

Para esta metodología, las variables independientes de los cálculos serán la altura aproximada de vuelo,  $altV$  y el porcentaje de solapamiento,  $solp$  representado como un valor comprendido en el intervalo abierto  $(0,1)$ . Para lograr cubrir todo el terreno, los recorridos se realizarán en formato zig zag. O sea, el dron se moverá en dos direcciones de forma iterativa. Primero, partiendo de un extremo atravesará todo el terreno en una dirección, avanzando a continuación pocos metros en la otra, para transitar todo el terreno en la primera dirección seleccionada pero en sentido inverso, luego volverá avanzar pocos metros en otra dirección y así sucesivamente. Cabe aclarar que en los modelos matemáticos no se hace referencia a los puntos cardinales de desplazamiento del dron ya que esto depende de las coordenadas especificadas por el usuario en el sistema para el contorno a mapear.

La Figura 10 ilustra los recorridos descriptos. El recuadro más grande que engloba a todos los elementos de la figura muestra el área de estudio, mientras que con una línea punteada se representa el recorrido hecho por el dron. Los recuadros pequeños que son conectados por dicha línea indican los puntos donde se capturarán las imágenes.

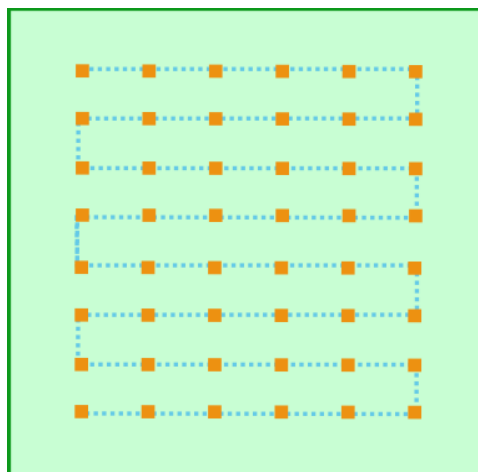


Figura 10: Estructura de los recorridos de tipo mapping 3D.

Se debe determinar para esta técnica qué rango de largo y ancho puede cubrir una foto tomada a determinada altura. Teniendo en cuenta el solapamiento, además será posible deducir de qué tamaño deberán ser los incrementos en el recorrido del dron para cubrir el largo y ancho del área de estudio. Estos valores pueden ser deducidos a partir de la mitad del largo de la foto,  $mlargoF$ , cuyo cálculo se presenta en la Sección 3.4.2 y a partir de la mitad del ancho de la foto,  $manchoF$ , que será presentado más adelante en esta sección.

Suponiendo un porcentaje de solapamiento de 50% ( $solp=0,5$ ), 4 fotos contiguas quedarían aproximadamente superpuestas como se puede apreciar en la Figura 11. Las escenas correspondientes a las fotos son distinguidas mediante 4 cuadros usando diferentes tipos de línea para sus bordes. Para que fuese comprensible el diagrama, el recuadro de línea punteada y el de bordes con estilo de trazo en forma de segmento y punto, se hicieron mas pequeños que los restantes a propósito.



Figura 11: Superposición de 4 fotos contiguas para un solapamiento de 50%.

Para calcular  $manchoF$  debe utilizarse el componente  $anguloFAncho$  del campo de visión y aplicar la misma secuencia de reglas trigonométricas que permitieron hallar a  $mlargoF$ . Para comprensión gráfica del problema, se presenta en el Figura 12 un triángulo similar al presentado en la Figura 8. Como en esta técnica no interviene ninguna estaca, el esquema resulta más simplificado.

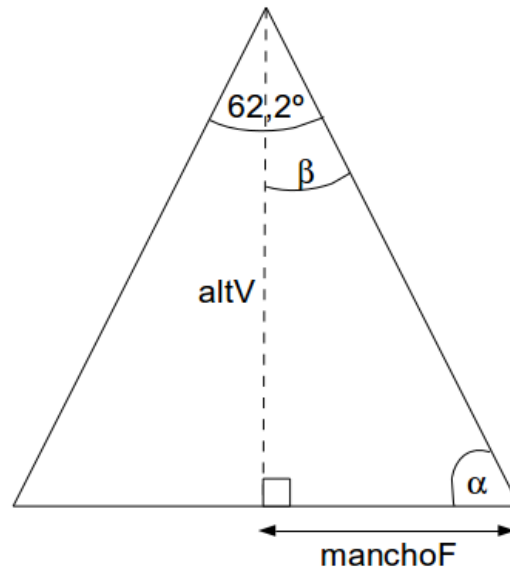


Figura 12: Variables involucradas en el cálculo de *manchoF*.

Cabe recordar que se deben de tener en cuentas los ajustes para la altura real, *altR*. Los cálculos necesarios para hallar *manchoF* se presentan a continuación. Al igual que sucedió en el caso anterior, para conocer la incógnita, deben determinarse previamente dos ángulos  $\beta'$  y  $\alpha'$ .

$$\beta' = \text{anguloFAncho}/2 = 62,2^\circ/2 = 31,1^\circ$$

$$\alpha' = 90 - \beta' = 58,9^\circ$$

$$\text{mlargoF} = \text{altR} / \tan \alpha'$$

Una vez que se conoce qué porción del terreno cubre un cuarto de foto, se debe aplicar el porcentaje de solapamiento *solp* para conocer la separación en metros que existirá entre foto y foto tanto si el dron se mueve en una dirección, como en la otra, permitiendo generar los correspondientes recorridos de vuelo. Los avances o incrementos para ambas direcciones pueden computarse de la siguiente forma:

$$\text{incLargoF} = (\text{mlargoF} * 2) * (1 - \text{solp})$$

$$\text{incAnchoF} = (\text{manchoF} * 2) * (1 - \text{solp})$$

Por otro lado, considerando que la resolución máxima de la cámara seleccionada es de 3280 x 2464 pixeles, de acuerdo a los cálculos realizados, se desprende que para una altura de 5m, la escena capturada mide 5.2 m de ancho x 3.9 m de largo. Esto significa que cada imagen tiene una definición de 6 pixeles/cm y que para cada cara visible de una estaca, dándole un alto de 5cm a cada franja pintada, esta tendría un área de 25 cm<sup>2</sup> que quedaría representada por una región de 36 pixeles aproximadamente.

Por lo tanto, para aplicar la metodología de procesamiento de imágenes se verifica que considerando 5cm para cada franja de la estaca y realizando vuelos con el dron entorno a los 5m de altura, es posible captar imágenes útiles para su procesamiento. Es más, considerando los cálculos realizados, incluso se puede utilizar una

resolución menor para la cámara. Por lo tanto, en principio la decisión para este tipo de recorridos fue realizar vuelos entorno a la altura mencionada, utilizando una resolución de 1300x975 pixeles, con la cual es posible obtener una definición de 2 pixeles por centímetro. Sin embargo, se mantuvo la máxima resolución para misiones de mapping 3D, realizadas a mayor altura, para de esta manera lograr alta calidad y precisión al momento de recrear las pasturas en formato tridimensional.

### **3.5 Herramientas de software**

Uno de los aspectos más relevantes de la consigna de este proyecto es el estudio y familiarización con la programación de UAV. Parte de este trabajo consistió en dominar, entender y evaluar el software tanto de uso como de desarrollo disponible para el dron utilizado.

En la placa controladora de vuelo de esta aeronave funciona el sistema operativo ArduCopter [50]. A su vez, para los drones compatibles con dicho software, existen distintas aplicaciones orientadas a los usuarios finales que permiten el control de la aeronave desde un dispositivo externo como son Mission Planner [51] y APM Planner [52]. Para desarrollar una aplicación, existe el framework DroneKit [53].

Debido a que este proyecto no se enfoca en el desarrollo de un producto orientado al cliente, se evaluó si efectivamente es necesario desarrollar una aplicación o no. Así como el lenguaje y herramientas más adecuados para su realización. En la Sección 3.5.1 se discuten estos aspectos.

#### **3.5.1 Elección de herramientas para control de dispositivos**

Se evaluaron distintas opciones de software de estación de control terrestre actualmente disponibles para el dron en cuestión. Algunas de ellas como Mission Planner, compatible con el sistema operativo Windows, o APM Planner, multiplataforma, son open-source, es decir, su código puede ser estudiado y modificado libremente, por lo que se analizaron las posibilidades de extensibilidad de estas de acuerdo a las necesidades particulares de este proyecto.

En la mayoría de los casos, en un análisis primario, se determinó que si bien estas aplicaciones brindan muchas facilidades a los usuarios, interfaces amigables para control del dron y especificación de los puntos a ser seguidos por este, logran cubrir solo parte de los requerimientos pautados en este proyecto. Ninguna de estas brindan opciones de backend para almacenar datos de los recorridos programados, ni de los vuelos realizados por el UAV en una base de datos, ni permiten el almacenaje de fotos a disco.

Por otro lado, la mayoría de estas son aplicaciones de escritorio, cuya arquitectura no sigue un modelo cliente/servidor. Esta arquitectura es necesaria para que la aplicación del módulo de control aéreo brinde servicios a los dispositivos móviles. Cabe recordar que estos se comunican remotamente con el módulo de control aéreo, por lo que una aplicación que despliegue una interfaz gráfica en la minicomputadora no sería visible por los usuarios de los dispositivos móviles.

Sin embargo, entre todos estos desarrollos, se encontró un proyecto denominado Tower for Web que comprende un ejemplo de una estación de control de tierra (GCS) con funcionalidades mínimas que permiten encender y cambiar el modo de funcionamiento del UAV, así como monitorear el estado de éste y del vuelo en curso a través de una interfaz web amigable. Su frontend fue programado con tecnologías web y su backend mediante Python [55], más Flask [56] y DroneKit. Flask es un microframework de Python con un núcleo simple y extensible, orientado al desarrollo de aplicaciones pequeñas y medianas con poco esfuerzo, requiere poca configuración, no obliga al uso de un patrón de diseño específico, lo cual lo hace ideal para el proyecto actual que no comprende el desarrollo de un producto. La aplicación Tower for Web utiliza una arquitectura cliente/servidor, además permite ser fácilmente extendida, gracias a la simplicidad de su código, el cual no es muy extenso.

En paralelo, por otro camino se analizó qué lenguaje de programación era el más conveniente a utilizar, teniendo en cuenta las posibilidades de herramientas de programación disponibles para este dron. El framework o SDK de desarrollo disponible para éste se denomina DroneKit y es compatible con todos los vehículos que usan el protocolo MavLink. A su vez, este cuenta con dos versiones. Una de ellas permite el desarrollo de aplicaciones Android y otra permite la codificación de todo tipo de aplicaciones utilizando el lenguaje Python. DroneKit-Android fue descartado porque está pobremente documentado y solo está orientado al desarrollo de aplicaciones móviles, no al desarrollo de una aplicación cliente/servidor como la que debería funcionar dentro del módulo de control aéreo.

Ambos caminos, nos llevaron a determinar que la mejor estrategia fue continuar con la extensión de la aplicación Tower for Web que utiliza el framework DroneKit-Python. Una de las razones que fundamenta esta decisión es que la interfaz de comunicación con la cámara de la Raspberry Pi también está basada en Python. Esto posibilita el desarrollo de una única aplicación escrita en un mismo lenguaje del lado del servidor para el control adecuado de todos los dispositivos incluidos en la arquitectura física del sistema. A su vez, se tenía conocimiento sobre las tecnologías web y el lenguaje mencionado, lo que facilitó su manejo. Python es un lenguaje con una extensa y buena documentación, fácil de aprender, cuya sintaxis ayuda a los programadores a escribir de forma simple y prolija. Se decidió trabajar en el desarrollo parcial de esta aplicación para cumplir con los requerimientos pautados y obtener las ventajas detalladas a continuación.

- Cumplimiento de requerimientos: es necesario continuar con la codificación para lograr satisfacer todos los requerimientos pautados para este proyecto, como son la persistencia de datos en una base de datos o ingreso de datos específicos de los recorridos como por ejemplo, número de padrón del potrero asociado al mismo.
- Modelo cliente/servidor: Una aplicación web emplea una arquitectura cliente/servidor, el cual debe ser aplicado para poder brindar servicios accesibles a los dispositivos móviles desde el módulo de control aéreo donde estará alojada la lógica de dicho programa.
- Flexibilidad: gracias a la codificación propia es posible indicarle al dron y a la cámara exactamente lo que se desea que hagan en un momento específico, lo cual requeriría de la aplicación de múltiples técnicas y

configuraciones si se utilizara otro tipo de herramientas. Un ejemplo de esto es aplicar algún tipo de manipulación o procesamiento de los puntos suministrados por el usuario, como son el ordenamiento, la categorización, etc, como paso previo a que el UAV vuele sobre el potrero siguiendo el recorrido estipulado. Otro ejemplo de instrucción específica sería tomar una fotografía mientras el dron vuela, o esperar a que éste se detenga en el aire para hacerlo. Cabe aclarar que las aplicaciones disponibles para el dron 3DR Iris+ son limitadas respecto al control de cámaras porque solo permiten control total de cierto conjunto de cámaras comerciales compatibles con la estrategia de hacking CHDK.

- Precisión: Mediante esta estrategia es posible la construcción de una herramienta a medida basada en los modelos matemáticos deducidos, donde puedan considerarse especialmente características precisas de cada tipo de modalidad de vuelo, como por ejemplo distinciones entre puntos estaca y comunes. Esto resulta fundamental para el estudio que se está llevando a cabo, donde las actividades de evaluación experimental a realizarse, determinarán la aplicación de ajustes al modelo propuesto para conseguir resultados mas confiables en términos de estimación de disponibilidad, por eso es necesario contar con la mayor cantidad de parámetros configurables.
- Portabilidad: como se trata de una aplicación web esta puede ser accedida desde cualquier dispositivo móvil que tenga un navegador web, independientemente de la plataforma que se trate, por lo que cualquier persona en el campo con su celular o tablet puede utilizarla.
- Mayor control: cuando al dron se le especifican rutas a través de la programación, este pasa al modo Guided, el cual permite que en todo momento el usuario pueda recuperar el control de la aeronave en caso de emergencia, desde el control remoto o desde una aplicación distinta seleccionando otro modo de vuelo manual.
- Reutilización de código: la posibilidad de basarse en código ya escrito y depurado puede reducir en gran medida los esfuerzos de desarrollo.

### **3.5.2 Entorno de operación**

Para el desarrollo de este proyecto fueron de mucho aporte los ejemplos disponibles en la documentación de DroneKit y Tower for web. El estudio de esta última aplicación sirvió para lograr un mayor entendimiento sobre cómo desarrollar con Python y Flask, servicios capaces de enviar señales de control al dron y a las cámaras, y que a la vez, ofrezcan urls de acceso en la web a distintas funcionalidades para los usuarios. Como se mencionó previamente, la aplicación original es muy pequeña, por lo que se reutilizó solo parte de su código para generar un software que se adaptara a las necesidades de este proyecto.

Debido a que el proyecto no presentó ninguna restricción en cuanto al uso de un determinado entorno de operación, y de acuerdo a la decisión de utilizar un módulo de control aéreo conectado al dron, así como de trabajar en extender la aplicación presentada previamente, se tomó la decisión de utilizar un entorno web. Esta decisión fue tomada considerando la necesidad de aplicar un modelo cliente/servidor para el desarrollo y por la portabilidad que este modelo brinda.

Otra de las ventajas de usar un entorno web es el poco consumo de espacio de disco y memoria en los dispositivos clientes, debido a que el procesamiento queda a cargo de un servidor. Para tareas de mantenimiento del sistema por parte de los desarrolladores, como son el reinicio de servicios, carga manual de información, inspección de archivos de LOG, etc, se utiliza el protocolo SSH para acceder mediante consola al módulo de control aéreo.

### **3.5.3 Arquitectura lógica del sistema**

Dentro del ciclo de vida que lleva el desarrollo del software, una de las pautas más importantes a tener en cuenta es la selección de la arquitectura lógica del sistema. A diferencia de la arquitectura física, la lógica determina de qué forma serán agrupadas los componentes de software o funcionalidades relacionadas de una solución.

Por defecto, la aplicación Tower for Web cuenta con dos capas de abstracción, una lógica y otra de presentación. La capa lógica está formada por un servicio encargado de comandar al dron en función de las peticiones web recibidas. La capa de presentación comprende la interfaz web accesible a los usuarios.

Con el objetivo de simplificar el desarrollo, mantenimiento y extensión futura de la herramienta a construir, se decidió mantener y perfeccionar la arquitectura en capas de la aplicación, delimitando e identificando claramente el campo de acción de cada componente. En primer lugar, se integró un nuevo nivel de abstracción a los existentes, encargado de la persistencia de los datos.

El sistema está formado por tres capas lógicas bien diferenciadas, Presentación, Lógica y Persistencia. Específicamente, las tareas de programación estuvieron enfocadas en la capa lógica donde se aplicó un modelo orientado a objetos para de esta manera dividir las responsabilidades del sistema en entidades que posean identidad y cooperen entre ellas.

### **3.5.4 Elección de herramientas de procesamiento de imágenes**

Como se anunció previamente, el departamento de Ingeniería Biológica desarrolló un módulo para calificar las fotos obtenidas en recorridos bajo la modalidad de procesamiento de imágenes, el cual sirvió como complemento a este proyecto. El mismo fue escrito en Python y se desarrolló tomando como base los aspectos acordados para la construcción de las estacas descriptos en 4.3.

El funcionamiento de esta aplicación básicamente consiste en distinguir la presencia de estacas en imágenes tomadas mediante vuelos del dron. De acuerdo a la posición en la cual sea captado este dispositivo respecto de la escena de la fotografía se le asigna una determinada calificación o score. Esta salida sirve para distinguir la mejor de una secuencia de fotos tomadas. Para cada estaca, el algoritmo además intenta determinar el número de franjas o regiones visibles de color azul aún no han sido cubiertos por las pasturas. Esta aplicación no retorna directamente en su salida la altura estimada de la pasturas entorno a cada estaca, sino que esta información debe ser deducida a partir del número de marcas detectadas por el algoritmo.



Al sistema a desarrollar se le decidió integrar esta aplicación para dar cumplimiento al requerimiento de visualización y análisis de resultados. Desde un punto de vista técnico, se acordó considerar a este módulo como una caja negra que brinda servicios al sistema, cuyo consumo requiere la implementación de interfaces. Mediante el procesamiento de imágenes, se pretendía estimar la altura de las pasturas presentes en las fotografías para de esta manera ofrecerle al usuario resultados aproximados de disponibilidad.

Por otro lado, para las fotos obtenidas durante vuelos de la modalidad mapping 3D, se requiere otro tipo de procesamiento distinto. Específicamente para las pasturas de cada potrero, se buscaba con esta metodología generar un modelo digital de superficie, o DSM (Digital Surface Model) [74]. A partir de dicho modelo, se pretendía obtener un modelo digital de terreno o DTM (Digital Terrain Model) [74]. Este tipo de modelo sirve para generar una representación aproximada de un terreno al desnudo (sin objetos encima). Finalmente, un modelo (estimado) de las alturas del canopy o CHM (Canopy Height Model) [75] sería derivado de los anteriores, al substraer el DTM desde el DSM. Esta estrategia para la estimación de la altura de las pasturas ha sido utilizada en algunos trabajos de investigación consultados [26,72,73].

Desde un primer momento, se tuvo claro que la generación de estos modelos no podría ser efectuada de manera eficiente desde la Raspberry PI, la cual posee pocos y limitados recursos de memoria y procesamiento. Además, dados los escasos tiempos del proyecto, se acordó seguir un camino rápido para encontrar una solución fácil de implementar y adecuada para la generación de los modelos. Esto implicó que no se destinara demasiado tiempo a la investigación y comparación de distintas soluciones para determinar la mejor.

Par lograr lo propuesto, se decidió explorar distintas herramientas de terceros existentes en el mercado, las cuales han sido ampliamente testeadas y específicamente diseñadas para estos fines. Entre las distintas opciones sugeridas por la documentación oficial de ArduCopter referente a la aplicación de la técnica mapping 3D [6], se pre seleccionaron las opciones OpenDroneMap [76] y Argisoft PhotoScan para su posterior evaluación. Para seleccionar la mas adecuada, ambas opciones fueron evaluadas una vez que se contó con imágenes obtenidas mediante el dron bajo esta metodología. En primer lugar se evaluó a OpenDroneMap y luego a Argisoft PhotoScan.

OpenDroneMap es una herramienta de software libre escrita en Python que permite automatizar los procesos de generación de modelos a través de una interfaz de línea de comando. Se instaló una instancia de este producto y se probó con distintos conjuntos de imágenes obtenidos durante los vuelos del dron para determinar si se ajustaba a los requerimientos y necesidades de este proyecto. Cabe aclarar que su instalación en Linux no es simple, ya que debe ser realizada por un usuario con conocimientos avanzados en administración de dicho sistema. La manera en que es presentado el progreso en la generación de modelos no es amigable para los usuarios. Para algunos conjuntos de imágenes se experimentaron errores, frente a los cuales en la página oficial de la herramienta no existe una respuesta clara. Por otro lado, no es sencillo identificar a qué tipo de modelo (nube de puntos, elevaciones del terreno, etc) corresponde cada uno de los archivos independientes resultantes de este procesamiento. Para poder visualizarlos además se necesita

utilizar una aplicación distinta. De acuerdo a esto, se pudo comprobar que esta herramienta no se encuentra en una etapa madura de desarrollo. Existe una aplicación web llamada WebODM [77] que se basa en esta herramienta y que permite un manejo más simple de los modelos, la cual aún no fue evaluada, pero será evaluada en el futuro.

Por su parte, la aplicación Argisoft PhotoScan tiene varias virtudes, en particular es fácil de utilizar, tiene una interfaz gráfica integrada de escritorio y puede instalarse en Linux, el cual es el sistema operativo que se dispuso como entorno de desarrollo del sistema. Esta es capaz de generar varios tipos de modelos, entre ellos, nube de puntos, mallas 3D, modelos de elevaciones del terreno (DSM y DTM), etc.

Se prestó especial interés sobre esta aplicación tras consultar un trabajo de investigación donde fue empleada para estimar disponibilidad de forraje, siguiendo una estrategia similar a la planteada en el presente proyecto [73]. Debido a esto, se decidió verificar la secuencia de pasos descriptas en este artículo para tener una mayor comprensión del mismo y de la herramienta.

Debido a que este producto no es de libre acceso y requiere una licencia, se debió solicitar una trial para su prueba. La instalación y experimentación inicial con sus funcionalidades fue rápidamente abordada gracias a tutoriales disponibles en la web. Se comprobó que además de tener una interfaz gráfica adecuada para visualización de los modelos, permite medir volúmenes y alturas sobre los DSM generados. Los avances o problemas que ocurran durante el procesamiento de datos son anunciados al usuario de forma clara y amigable. La aplicación permite además clasificar los puntos de los modelos de acuerdo a los que corresponden con el terreno y los que no. Gracias a esta característica fue posible generar modelos de terreno o DTM. Teniendo en cuenta todas estas ventajas, esta aplicación fue seleccionada como la más adecuada para la realización de este tipo de procesamiento en este proyecto.

Una vez definida la herramienta a utilizar, fue necesario investigar un poco más para lograr la correcta generación de modelos. Esta herramienta, al igual que otras vinculadas con la temática de mapping 3D, permite el uso de puntos de apoyo para perfeccionar los modelos. Los puntos de apoyo son útiles para evitar que los modelos generados estén girados, trasladados o escalados respecto de la realidad. Para esto son necesarios como mínimo 3 puntos. Para mejorar aún más la precisión de los modelos se recomiendan 6 o 7 puntos de apoyo [82]. Estas posiciones deben estar claramente referenciadas en el campo para que posteriormente sean fácilmente identificables en las fotografías desde la herramienta ArgiSoft Photoscan.

A partir del trabajo de investigación mencionado, surgió la necesidad de contar además con otra aplicación para generar los mapas de altura de pasturas o CHMs, a partir de los DSMs y DTMs provenientes de Argisoft PhotoScan. En el mencionado artículo fue utilizado ArcGis [80] para esta tarea, pero este tampoco es un software de libre acceso y requiere una licencia. A su vez, no está disponible para el sistema operativo Linux, el cual fue seleccionado para el entorno de desarrollo. Luego de investigaciones, se decidió utilizar la alternativa de libre acceso Qgis, la cual está disponible para Linux y permite generar fácilmente un CHM, a partir del suministro de los DTM y DSM involucrados en esta operación. El conocimiento que posee el

equipo de Fagro en la herramienta Qgis es otra ventaja de usar esta alternativa, debido a que los modelos generados por este proyecto podrán ser útiles para dicho equipo.

### 3.6 Desarrollo de software

Esta sección comprende el desarrollo de software llevado a cabo, describiendo detalles de las tareas de Análisis, Desarrollo, Implementación y Verificación del código. En la siguientes secciones se describe cómo fueron abordadas estas distintas etapas. Para el análisis y diseño se presentan los modelos resultantes de dichas actividades.

#### 3.6.1 Análisis

##### Modelo dominio

La Figura 13 presenta el modelo de dominio resultante del análisis.

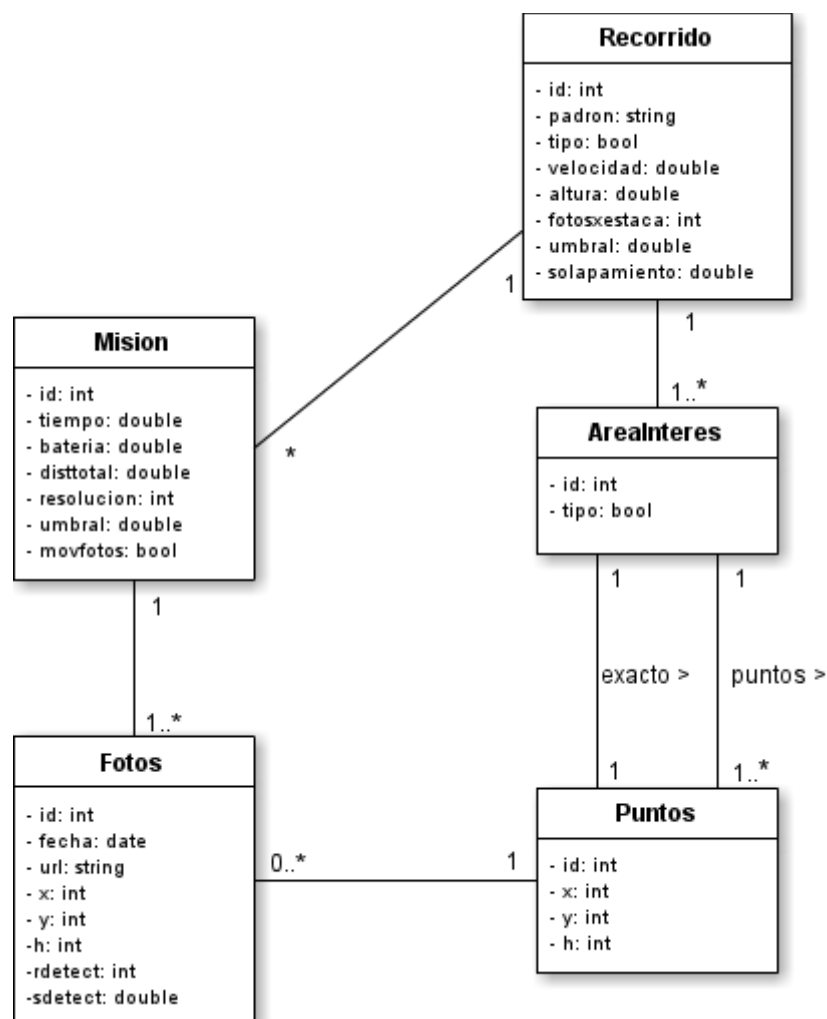


Figura 13: Modelo de dominio.

Las restricciones no estructurales del modelo presentado son las siguientes.

- Los atributos *Id* identifican unívocamente a cada instancia de cada concepto.
- Una misión solo puede contener fotos que están asociadas al mismo recorrido del que pertenece esta.

En el análisis del modelo de dominio se tuvieron en cuenta distintos aspectos. Por un lado se visualizaron tres conceptos principales que permiten manejar los recorridos en el sistema. Todo recorrido define una determinada configuración de vuelo que debe ser persistida en el sistema y contiene los siguientes atributos:

- *tipo*: representa el tipo del mismo en el sistema y distingue un vuelo de evaluación de estacas de un vuelo de aplicación de la técnica mapping 3D.
- *padrón*: resulta de interés por los agrónomos conocer el padrón en el cuál fueron realizados los recorridos por lo que se incluye dicho atributo.
- *velocidad*: es la velocidad que deberá mantener el dron durante todo su vuelo.
- *altura*: altura inicial que deberá alcanzar el vehículo inmediatamente luego de su despegue.

En este sistema, para los recorridos en la modalidad de procesamiento de imágenes (seguimiento de estacas), un área de interés puede estar formada por un punto aislado (o común) del terreno no vinculado con una estaca, o por un subconjunto de uno o más puntos próximos a una estaca que definen su zona de estudio. El concepto cobra sentido por el interés de tomar más de una foto de cada estaca desde distintos ángulos para tener mayores probabilidades de captar una imagen útil para los posteriores algoritmos de procesamiento. Toda área de interés, tiene un atributo *tipo* que determina si esta corresponde con un punto aislado o común, o por el contrario, está vinculada con una estaca. En particular, para la modalidad de vuelo de mapping 3D, cada área de interés se corresponde con un único punto del sistema.

Por cada área de interés, uno de sus puntos conformantes indica fielmente el punto exacto del terreno que se desea observar. Cada punto en el sistema está directamente vinculado con una coordenada.

Por otro lado, una misión representa una instancia de realización de un determinado recorrido por el UAV, la cual debe ser registrada en el sistema. En cuanto a problemas tecnológicos afrontados, cabe recordar que es fundamental estimar la autonomía necesaria para que el UAV logre realizar los distintos recorridos de los potreros. Por lo tanto, con el fin de proyectar rendimientos, toda misión contendrá los siguientes atributos:

- *tiempo*: tiempo en segundos de duración total del vuelo.
- *bateria*: porcentaje de batería consumido durante el vuelo.
- *disttotal*: distancia total estimada recorrida por el dron durante la misión.

Estos valores pueden registrar diferencia no solo para distintos tipos de recorrido, sino que también para dos instancias de realización de un mismo recorrido, debido a cambios en el entorno como disponibilidad de satélites, viento, etc. Esto motiva que sean almacenados en el sistema para estudio posterior.

Para cada misión, existen fotos, cada una de las cuales está vinculada a un único punto particular. Cada foto tiene asociada su propia coordenada GPS, lo cual puede parecer redundante, disponiendo del dato de la posición del punto asociado. Si bien la ubicación de la fotografía puede diferir levemente de la ubicación del punto original, es de interés en este proyecto ser precisos, por lo tanto se considera importante conservar la posición exacta del lugar donde se tomó la foto.

Durante el desarrollo del proyecto, se fueron incorporando nuevos parámetros al sistema con el fin de estudiar el funcionamiento del UAV frente a distintas configuraciones. De esta manera, surgieron los atributos *fotosxestaca*, *umbral*, y *solapamiento* para los recorridos y *umbral* y *movfotos* para las misiones. Con el fin de conservar en el sistema los resultados generados producto del procesamiento de imágenes, se incluyeron los atributos *sdetect* y *rdetec* para las fotos. Estos atributos se describen en mayor detalle en la Sección 4.1. Cabe aclarar que esta estructura fue definida de esta manera para garantizar la extensibilidad futura del sistema.

## Casos de uso

Se distinguen los siguientes casos de uso cuya implementación es crítica pues son imprescindibles para el funcionamiento del sistema y el cumplimiento de requerimientos.

- Crear recorrido
- Realizar misión

Además de la siguiente funcionalidades opcional:

- Listado y procesamiento de imágenes

### *Crear recorrido*

A través de este caso de uso se puede especificar al sistema qué recorridos debe realizar el dron. El usuario debe ingresar obligatoriamente todos los datos básicos del recorrido, como son el padrón, velocidad, altura inicial de vuelo, y tipo del mismo. Los recorridos son distinguidos en dos grandes categorías, las cuales son de seguimiento de estacas y mapping 3D.

A continuación, el usuario debe ingresar los distintos puntos de interés a ser visitadas por el dron durante el lanzamiento del recorrido, indiciando los atributos correspondiente a cada punto, como son el tipo y coordenada de su ubicación exacta. El mencionado atributo tipo admite dos valores posibles, común o estaca.

Para un recorrido de seguimiento de estacas, los puntos de interés a ingresar representan las coordenadas de ubicación exacta de las estacas a ser visitadas, mientras que para el caso de mapping 3D, sirven para determinar el contorno del área a ser mapeada. Específicamente, dicho contorno debe ser especificado con tres posiciones.

Cabe aclarar, que el sistema admite dos posibles formatos para el ingreso de coordenadas, las mismas pueden suministrarse como posiciones en metros relativas al punto de partida del dron o como posiciones absolutas GPS. En caso del ingreso en formato GPS, junto a la primera coordenada suministrada, debe especificarse su posición relativa correspondiente a los efectos de realizar cálculos internos.

Una vez que el usuario confirme el alta del recorrido en el sistema este permanecerá almacenado para su uso en el caso de uso de realizar misión.

### *Realizar misión*

Esta funcionalidad permite indicarle al dron que efectúe un determinado recorrido almacenado previamente. Para esto, el usuario debe seleccionar el recorrido deseado, ingresar parámetros de vuelo y solicitar su ejecución. A continuación, el dron despegará desde el punto de partida, cumplirá con el itinerario solicitado y regresará a dicho punto para aterrizar allí finalmente.

La misiones se realizan de forma automática y transcurren sin necesidad de intervención por parte del usuario. El tipo de misión depende del tipo de recorrido seleccionado previamente. En todo momento y en caso de detectar problemas con el itinerario, el usuario tiene opciones básicas para recuperar el control del dron que le permiten solicitar que la aeronave aterrice en el lugar o regrese al punto de partida para hacerlo.

Durante el transcurso de un vuelo, la cámara digital captura imágenes georeferenciadas, estas junto a todos los datos obtenidos en la misión son persistidos en la base de datos. Cabe aclarar que el sistema solo toma fotos para los puntos definidos en el recorrido como estacas, no para los comunes (ej.: el punto de partida).

### *Listado y procesamiento de imágenes*

Por cada misión efectuada previamente, este caso de uso permite desplegar la colección de imágenes obtenidas durante el transcurso de las mismas. Cada foto se visualiza en formato de miniatura, pudiendo accederse a la versión en tamaño real de la misma.

Además el usuario, puede seleccionar una de ellas y solicitar su procesamiento. Una vez que el sistema culmine con esta tarea, presentará resultados que indicarán estimaciones de la altura de las pasturas presentes en dicha imagen.

## **3.6.2 Diseño**

La etapa de diseño del desarrollo de software orientado a objetos, se realiza para determinar la estructura de clases definitiva del sistema y para definir de qué manera se comunicarán e interactuarán los objetos en el sistema, para resolver las distintas funcionalidades definidas en el análisis. Para esta etapa, es clave hacer una correcta asignación de responsabilidades a las clases correspondientes.

Para el desarrollo de este proyecto se empleó un modelo iterativo incremental, por lo cual el sistema se fue perfeccionando y desarrollando con cada nueva iteración del mismo. Por esta razón, los modelos fueron ajustándose de manera paulatina a la realidad del problema.

Durante el desarrollo, se consideró importante hacer un diseño, para determinar de qué manera integrar los conceptos deducidos durante el análisis, dentro de la aplicación Tower for Web, la cual se pretendía extender. Esta estructura de clases se situó en la capa lógica de la arquitectura lógica del sistema previamente presentada.

A cada concepto del modelo de dominio se le asoció una clase correspondiente. Se introdujeron dos clases controladores extras, las cuales fueron responsables por el cumplimiento de las responsabilidades del sistema. Particularmente, a la clase *ControladorWeb* se le asignó las tareas de atender las peticiones de los usuarios y de controlar el funcionamiento del UAV, mientras que a la clase *ContCamaraMision* se les dió las responsabilidades de controlar la cámara y de manejar el estado y datos actuales de la misión. No se definieron ni diseñaron operaciones para las clases, debido a los escasos tiempos, y a que el desarrollo de un producto final quedaba fuera del alcance de este proyecto. En la estructura resultante se aplicaron los criterios GRASP para lograr una correcta asignación de responsabilidades a cada clase, las cuales se mantuvieron durante la etapa de implementación. Además, debido al requerimiento de persistencia de datos, se consideró necesario definir una estructura de base de datos, que permitiese almacenar los objetos manipulados por el sistema. En las figuras 14 y 15 se presentan los diagramas de entidad-relación y de clases respectivamente, utilizados para la construcción del sistema.

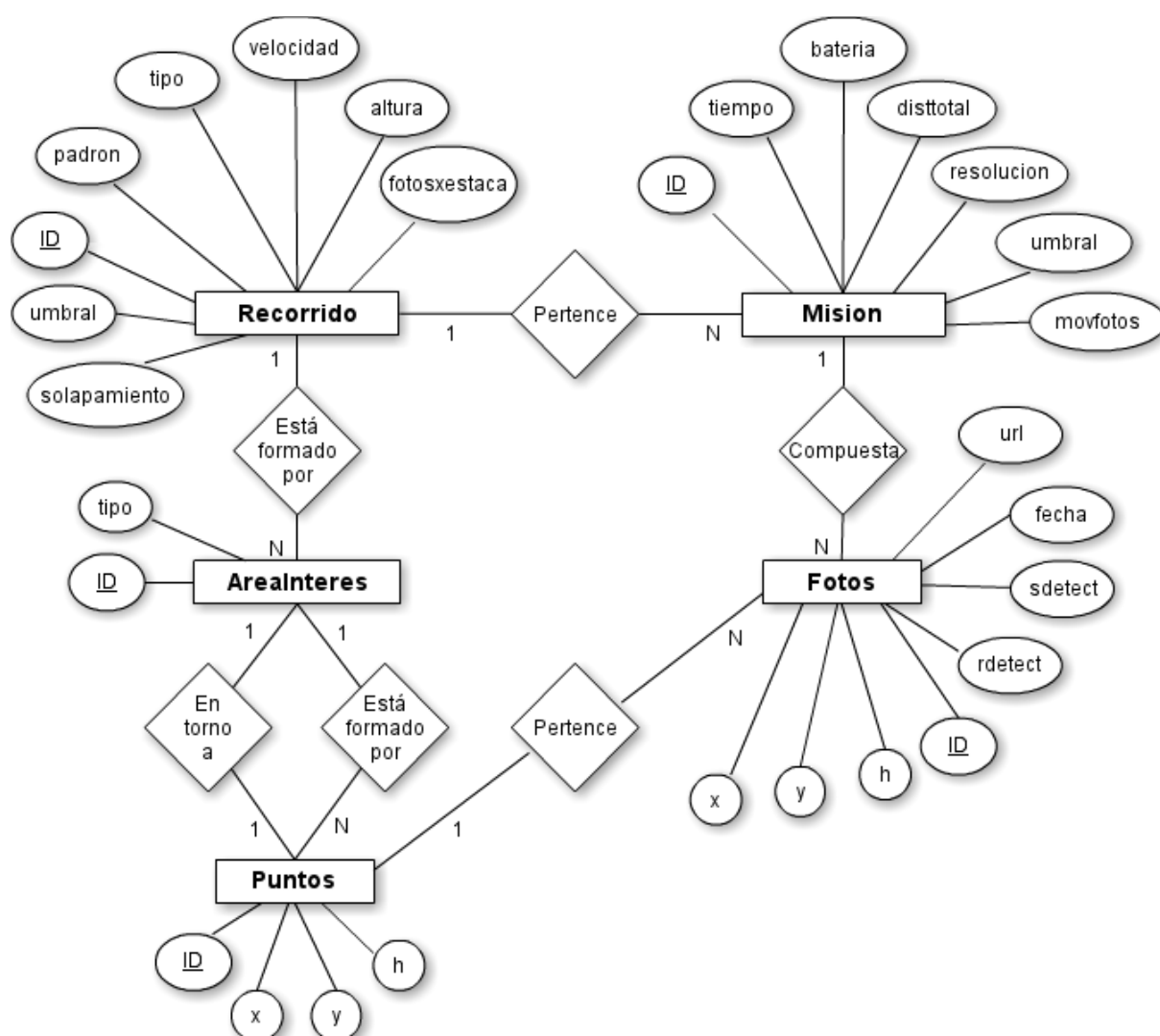


Figura 14: Modelo entidad-relación.



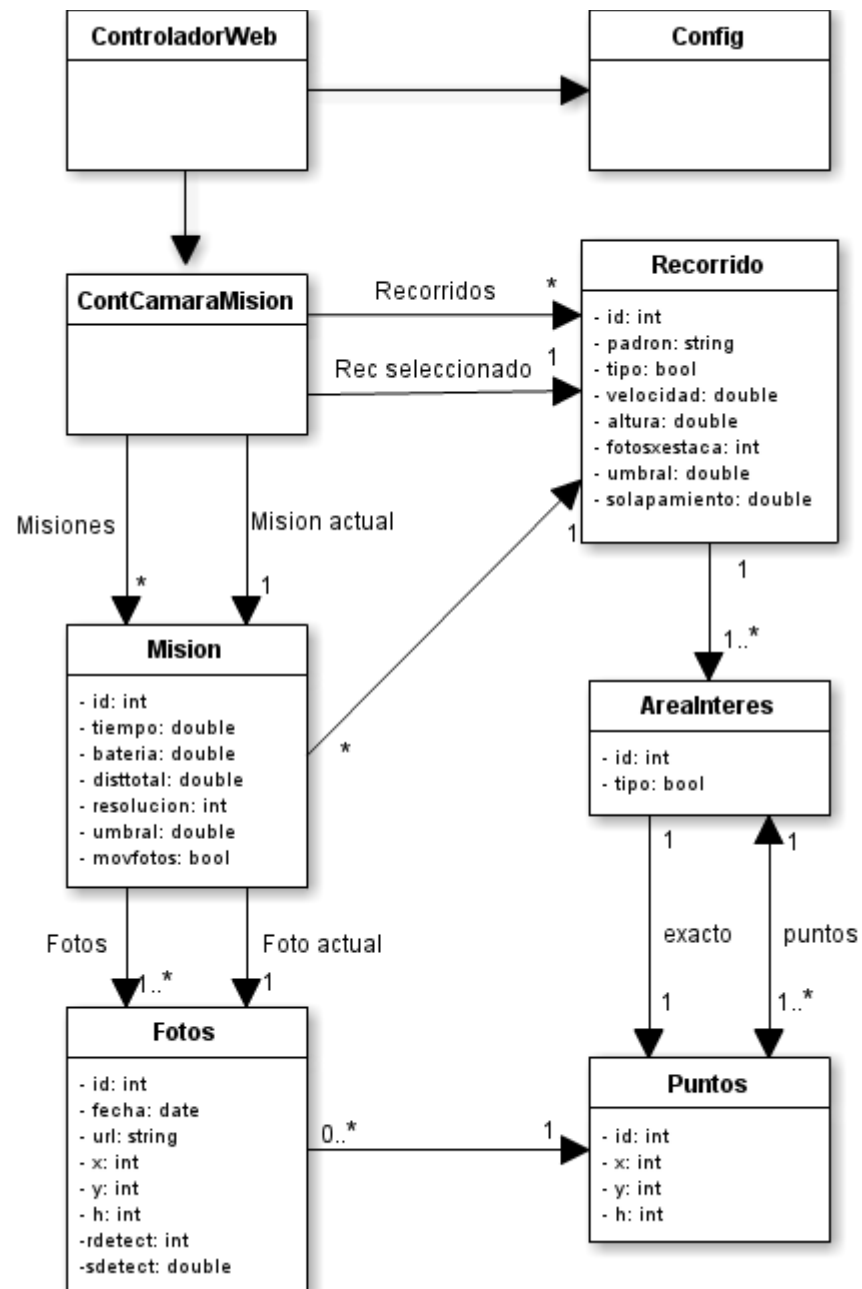


Figura 15: Diagramas de clases del sistema.

### 3.6.3 Implementación

El lenguaje de programación seleccionado para el desarrollo fue Python. El mismo incluye poderosas herramientas y librerías que contribuyeron a la implementación de la aplicación. Para abordar esta etapa se creó un entorno de desarrollo sobre un máquina con sistema operativo Linux. En etapas avanzadas de desarrollo fue utilizado el IDE Pycharm [57], aunque también fueron aprovechadas las propiedades del editor liviano Gedit [94]. La interfaz de usuario se generó mediante tecnologías web, incluyendo “Html”, “Css”, “Javascript” y “Jquery”.

Para comenzar con el desarrollo de la aplicación y entender cómo controlar un dron, se utilizó el conjunto de ejemplos Guided Mode Movement and Commands disponibles en la web de DroneKit [58]. Existe la posibilidad de simular un dron de este tipo gracias a DroneKit-SITL [95], lo cual resulta muy útil para realizar una validación inicial del funcionamiento de la aplicación antes de su prueba en campo abierto sobre el dron real.

Con la herramienta DroneKit es posible recuperar en todo momento información del estado del dron, además de enviarle instrucciones como por ejemplo aterrizar, despegar, moverse hacia una determinada posición, o cambiar su modo de operación [59]. Existen distintas formas de indicarle al dron que se mueva, pero en este proyecto interesa suministrarle al sistema un conjunto de posiciones GPS para estructurar los recorridos a ser seguido por el dron. DroneKit permite también posicionamiento mediante vectores de velocidad pero esto no será tratado en este proyecto, quedando fuera del alcance del mismo.

El control de la cámara de la Raspberry PI fue implementando haciendo uso de la interfaz Picamera [86], escrita en Python y diseñada específicamente para el control de dicha cámara. Este paquete brinda múltiples opciones configurables para la captura de fotografías. Entre estos se encuentra la resolución, opción que fue parametrizada para los distintos vuelos del dron.

#### **Cálculo de las distancias entre puntos**

DroneKit tiene una instrucción especial llamada Simple\_goto [60] que permite especificarle al dron una posición hacia la cual moverse, en formato GPS (latitud, longitud y altitud). Sin embargo, este framework no dispone de ningún mecanismo de feedback para anunciar al programa cuando el dron ha alcanzado dicha posición. Por el contrario, queda a cargo del desarrollador la determinación esta condición, chequeando de forma iterativa si la distancia que resta por alcanzar el punto en cuestión es suficientemente pequeña para considerar que fue alcanzado. A este valor mínimo aceptable se le llamará umbral de la distancia de aquí en mas.

Cabe aclarar, que para determinar la distancia entre dos posiciones GPS se debe de tener en cuenta el radio de la Tierra en los cálculos. La guía Guided Mode Movement and Commands [58], propone una función para calcular la distancia entre dos coordenadas GPS. Dicha función puede expresarse con la siguiente fórmula:

$$\sqrt{(lat\ 2-lat\ 1)^2+(long\ 2-long\ 1)^2}*1.113195e5$$

donde lat1, lat2 y long1, long2 son los componentes latitud y longitud de las coordenadas 1 y 2 respectivamente.

Sin embargo, esta fórmula no está bien documentada y arroja un resultado muy aproximado. Por lo tanto, para tener mayor precisión, consultando la literatura existente se decidió sustituirla por la fórmula Haversine [61] comúnmente utilizada para este tipo de cálculos. Esta fórmula también conocida como fórmula del “Semiverseno” permite determinar la distancia y el ángulo entre dos posiciones GPS y constituye una ecuación muy importante para la navegación astronómica. Específicamente, brinda una aproximación esférica de la distancia existente entre dos posiciones GPS sabiendo su longitud y su latitud, conociendo además el radio de la Tierra. Su ecuación [62] es la siguiente:

$$d=2*r*\arcsin(\sqrt{\sin((\Phi 2-\Phi 1)\div 2)^2+\cos(\Phi 1)*\cos(\Phi 2)*\sin((\lambda 2-\lambda 1)\div 2)^2})$$

donde  $\Phi 1$ ,  $\Phi 2$  y  $\lambda 1$ ,  $\lambda 2$  están expresadas en radianes y se refieren a la latitud y a la longitud de las coordenadas 1 y 2 respectivamente. La variable  $r$  corresponde al radio terrestre y depende de la latitud, debido a que el planeta Tierra no es una esfera perfecta. Para esta se consideran tres posibles valores, el radio ecuatorial de 6378.1 km, el polar de 6356.8 km o el medio de 6371.0 km. Para este proyecto  $r$  es fijo y equivale al radio medio.

### Posiciones absolutas y relativas

Existen distintas fuentes de error que impiden que los receptores GPS informen con exactitud la posición en un determinado momento. Algunas de estos factores son fenómenos meteorológicos, variaciones en la disponibilidad de satélites u otros ruidos y desajustes.

Para fijar su posición en el momento actual, un receptor GPS requiere captar señales microondas desde al menos cuatro satélites. De cada uno de ellos necesita conocer su posición y el tiempo de demora de la señal recibida. A partir de estos datos, el receptor establece su ubicación por triangulación. En la mayoría de los receptores GPS, pequeñas diferencias registradas entre los tiempos medidos por su cronómetro interno y los tiempos reales del GPS, que sincronizan a todo el sistema de posicionamiento, pueden dar lugar a un desfase de 10 nanosegundos. Debido a que las señales de microondas GPS viajan a la velocidad de la luz, esto es equivalente a un error de 3 metros. Por esta razón, la mayoría de los receptores GPS tienen un error de  $\pm 3$  metros en su precisión. Sin embargo, existen otros receptores más sofisticados, como los utilizados por militares que logran ser 10 veces más precisos que los comunes [63].

Cabe recordar que la idea de este proyecto en principio es suministrarle al dron un conjunto de posiciones GPS que deben ser recorridas. Teniendo en cuenta lo expresado previamente y debido a la necesidad de tener precisión en el posicionamiento, se buscaron estrategias para minimizar el error en la obtención de posiciones GPS. Esta fue una de las primeras dificultades que se vislumbraron en

este proyecto.

Inicialmente, no se definió o especificó el instrumento que se utilizaría para realizar las mediciones de campo a ser suministradas al dron. Si bien se pretendía utilizar un dispositivo de alta precisión para esta tarea, el mismo no carecería de error. A esto hay que sumarle el error del recolector GPS a bordo del dron. Si el dispositivo de medición tiene un error de  $\pm a$  y el GPS del dron uno de  $\pm b$ , entonces el error total de posicionamiento sería de  $\pm(a+b)$ .

Para una mayor comprensión de este tipo de problemática se decidió realizar algunas pruebas para comparar las potenciales diferencias que pudieran existir en las mediciones tomadas a través de distintos medios.

En primer lugar, se identificó un punto de partida del dron. Luego se hizo una serie de vuelos con la aeronave para comprobar como se posicionaba sobre dicho punto. Posteriormente, tras calcular las distancias existentes entre las latitudes y longitudes registradas por la aeronave en dicho punto se obtuvo un resultado de 1 metro, lo que evidencia que desde la óptica del dron las coordenadas GPS de una misma ubicación del terreno van a variar para distintos vuelos.

En segundo lugar, utilizando el dron y dos aplicaciones de celular, se registraron posiciones GPS para tres puntos contiguos del campo. De esta manera, se obtuvieron tres posiciones GPS por punto. Posteriormente, se determinaron las diferencias existentes en metros entre los valores registrados para cada punto. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 4. Las posiciones medidas con el dron se referencian como D1, mientras que los valores obtenidos con las aplicaciones Coordinates y Latitud (ambas Android), se referencian como D2 y D3 respectivamente.

| Diferencias (m) | Puntos |      |      |
|-----------------|--------|------|------|
|                 | 1      | 2    | 3    |
| D1-D2           | 7,07   | 5,04 | 3,77 |
| D1-D3           | 8,56   | 9,34 | 5,52 |
| D2-D3           | 2,61   | 4,52 | 5,22 |

Tabla 4: Distancias en metros entre ubicaciones GPS medidas para tres puntos del terreno a través de distintas técnicas.

Cabe aclarar, que cada celda de información de esta tabla indica la distancia existente entre dos posiciones obtenidas, mediante dos herramientas distintas, para un mismo punto del campo. Como se puede observar en esta tabla, los valores calculados superan los 2,6 metros para cada par de métodos utilizados y para cada uno de los tres puntos considerados. En los peores casos, estas diferencias rondan los 9 metros. Estos valores demuestran una importante falta de precisión de los métodos de medición empleados.

A raíz de estas experimentaciones se concluyó que para mejorar el posicionamiento, una vía válida para almacenar las posiciones de los puntos a ser recorridos es utilizar coordenadas definidas en metros y relativas al punto de partida del dron, en lugar de mantenerlas como coordenadas absolutas, o sea en formato GPS. La

estrategia completa es registrar las posiciones a ser recorridas mediante un dispositivo GPS e ingresarlas al sistema en este formato, indicando para la primera posición su correspondencia con una coordenada relativa (ej.: -32,32583, -58,04772 corresponde con el punto 0,0). El sistema internamente convierte todas las coordenadas “absolutas” suministradas en coordenadas relativas al punto de partida en el que debe despegar el dron y las almacena en la base de datos en dicho formato. Cuando se le solicita al sistema que ejecute un determinado recorrido, las posiciones relativas son leídas y convertidas en posiciones “absolutas”, a partir de la primera coordenada recibida por el receptor GPS del dron cuando este se enciende, para lo cual debe estar obviamente ubicado en su punto de partida.

La desventaja de este modelo es que se debe conservar señalado en el campo el punto de partida del dron. Para esto se decidió utilizar otra estaca. La ventaja es que para los distintos vuelos de un mismo recorrido el dron no estará guiándose por posiciones GPS que puede entender como muy alejadas de la ubicación real de los puntos, sino que siempre se le solicitará que avance la misma cantidad de metros en una determinada dirección a partir de un mismo punto de partida. Incluso, haciendo los ajustes necesarios para colocar las estacas aproximadamente en las posiciones donde se visualiza que pasa el dron para algunos vuelos, se puede mejorar aún más el posicionamiento. De estas formas se logra reducir el error de posicionamiento GPS.

### **Ordenamiento de coordenadas**

El presente sistema incluye una funcionalidad de ordenamiento de las coordenadas GPS ingresadas por el usuario. La misma fue implementada con el fin de facilitar el suministro de múltiples posiciones durante la definición de recorridos. Especialmente, fue muy útil para la realización de algunos experimentos para los cuales fueron colocadas 30 estacas en un potrero. Gracias a esta funcionalidad, las coordenadas pueden ingresarse en cualquier orden posible. La excepción de esta regla, es la primera coordenada del punto de partida, la cual debe suministrarse en primer lugar. Esta mejora fue también de interés para optimizar el consumo de tiempo y batería utilizados en los recorridos programados.

Debido a que el ordenamiento de puntos no se consideró una funcionalidad crítica del sistema, fue poco analizada y tratada en la primera versión incremental del proyecto. Para dar solución a este problema, el algoritmo utilizado en esta instancia consideraba un grafo completo formado por todos los puntos y aplicaba una estrategia similar a la del algoritmo Dijkstra [64]. Dijkstra sirve para determinar el camino más corto entre cualquier par de vértices de un grafo, pero a diferencia de éste, con el algoritmo desarrollado se buscó unir cada vértice del grafo con su vecino más cercano de forma iterativa. Por lo tanto, en un primer paso, se calculaban las distancias a todos los puntos, respecto del punto inicial. El siguiente punto a visitar sería el más cercano respecto este cálculo. En el siguiente paso, de la misma forma y partiendo desde el punto actual, se determinaba el siguiente punto más cercano a visitar. Este proceso se repetía iterativamente hasta visitar todos los puntos. En cada paso iterativo, se descartaban los puntos visitados previamente. Este algoritmo funcionó para pruebas iniciales con pocos puntos, pero rápidamente se pudo ver que no era óptimo para todos los posibles escenarios.

Luego de investigaciones, se logró determinar que el problema a enfrentar era el conocido Problema del Viajante o del Agente Viajero, cuyas siglas son TSP. Este es un problema de optimización combinatoria muy importante en la ciencia de la computación y específicamente en la investigación operativa ya que es de tipo NP-duro [65]. Se formula a partir de un conjunto de ciudades y las distancias entre estas, y consiste en encontrar cuál es la ruta más corta que partiendo desde la ciudad de origen pasa una única vez por las restantes y regresa a la ciudad inicial. En este proyecto la única diferencia con esta formulación, es que los elementos en cuestión son estacas en lugar de ciudades, pero su esencia es exactamente la misma.

En este trabajo el problema fue modelado como un grafo completo, porque en principio no existe ningún impedimento en moverse desde una estaca a la otra. Los vértices del grafo son las estacas y las distancias entre estas son los pesos de las aristas. Dado este escenario, si se consideran  $N$  estacas, existirán  $N!$  rutas o combinaciones posibles a ser evaluadas. Por lo tanto, si  $N$  valiera 10, existirían 181440 combinaciones posibles, si  $N$  valiera 30 existirían más de  $4 \times 10^{31}$ , por lo que se necesitarían  $10^{18}$  años para poder evaluar todas las combinaciones y resolver el problema en una computadora que calcule un millón de combinaciones por segundo. Esto demuestra claramente las limitaciones que presentaría en este caso un algoritmo exacto no optimizado.

Para resolver este problema se estudiaron distintos algoritmos que utilizan algún mecanismo de optimización para resolverlo de manera exacta o aproximada. El algoritmo Held-Karp [66] es una solución exacta del problema que utiliza la técnica de programación dinámica. Una versión de Held-Karp fue programada en Python; antes de utilizarla con el dron, se probó su funcionamiento con un recorrido de 10 estacas dando muy buenos resultados en escasos minutos, sin embargo para 30 estacas se estimó un tiempo de ejecución necesario de 15 días para ordenar los puntos del recorrido.

A raíz de los resultados obtenidos, se decidió explorar algoritmos genéticos para resolver el problema, los cuales si bien no generan soluciones exactas, ofrecen buenos resultados en tiempos razonables. Los algoritmos genéticos surgieron en los años 1970 de la mano de John Henry Holland y forman parte de la familia de algoritmos evolutivos [67]. Son heurísticas diseñadas para problemas de optimización, búsqueda y aprendizaje y están inspiradas en los procesos de evolución natural y genética, de donde proviene su nombre. Trabajan con una población de individuos, cada uno de los cuales refiere a una posible solución de un problema dado. A cada individuo se le otorga una puntuación, que indica la bondad de dicha solución. Estos algoritmos hacen evolucionar a dicha población, someténdola a acciones aleatorias semejantes a las que intervienen en la evolución biológica, como mutaciones, recombinaciones genéticas, etc. Luego de esto, se aplica un proceso de selección sobre la población para determinar cuáles son los individuos más adaptados al problema, que sobrevivirán, y cuáles los menos aptos, que serán descartados. De esta manera, se genera una nueva población de posibles soluciones que reemplaza a la anterior ya que contiene individuos mejor calificados que ésta.

El desarrollo de un algoritmo genético está fuera del alcance de este proyecto, por lo

que se decidió utilizar un algoritmo ya implementado, de libre acceso y que no requiriera demasiado esfuerzo para incluirlo en el sistema como un módulo del tipo caja negra. Por lo tanto se seleccionó una implementación de este algoritmo [68] escrita en Python y basada en la versión original escrita en Java [96] por Jacobson Lee [69]. La utilización de este algoritmo genético permitió la resolución de forma eficiente y satisfactoria del problema planteado. Cada ejecución con 30 puntos duró escasos minutos. Las modificaciones que debieron aplicarse para adaptar la solución al presente proyecto fueron pocas. Originalmente el algoritmo procesaba un conjunto estático de datos de entrada, por lo que debió adaptarse para el ingreso de puntos de forma dinámica. Además, se modificó el parámetro del tamaño de población desde 100 a 1000 para lograr obtener mejores resultados frente a un escenario de 30 estacas. Cabe aclarar que no se realizaron ajustes de los restantes parámetros del algoritmo genético, lo cual permitiría obtener mejores resultados o resultados en menor tiempo de ejecución. En particular, este algoritmo emplea métodos de mutación por intercambio y de cruzamiento para cromosomas ordenados, siendo su probabilidad de mutación de 1,5 %.

### **Integración del módulo de procesamiento de imágenes**

Para lograr la integración del módulo de procesamiento de imágenes, el cual sería considerado una caja negra del sistema, fue necesario conocer su formato de datos de entrada y salida.

Este módulo posee varios parámetros de entrada configurables, sin embargo, los más destacables son *min\_area\_size*, *resize* y *threshold*. Estos valores deben ser correctamente ajustados para conseguir buenos resultados. La opción *min\_area\_size* define el área mínima en píxeles que debe poseer una región de la foto para que el algoritmo la considere como una franja visible de la estaca. La opción *resize* recibe valores reales en el intervalo [0,1] y establece en que porcentaje respecto de la versión original debe ser redimensionada la foto antes de su procesamiento. Los valores a ser utilizados para ambas opciones mencionadas dependen en gran medida de la resolución de las fotografías a evaluar. El *threshold* es utilizado para filtrar los puntos que corresponden con franjas pintadas de las estacas, de acuerdo al color que poseen. Con este parámetro se establecen los criterios de selección de puntos en base a los rangos del espectro electromagnético considerados para tres bandas espectrales (RGB) presentes en la fotografía.

Además de las consideraciones tenidas en cuenta hasta el momento respecto de la construcción de las estacas (dimensiones, colores, etc.), es fundamental definir correctamente estos patrones de tonalidades a través del parámetro *threshold*, para conseguir buenos resultados durante el procesamiento de distintas secuencias de fotos. Para el procesamiento de fotografías a color e infrarrojas, los valores utilizados cambiaron notoriamente debido a que las cámaras RGB captan todo el espectro visible, mientras que una NGB capta una porción diferente del espectro electromagnético, que incluye la banda del infrarrojo cercano, la cual no es visible por el ojo humano. Por otro lado, estos valores también debieron ser adaptados de acuerdo al momento del día en el cual fueron tomadas las imágenes, debido a que las condiciones de luminosidad determinan distintas tonalidades para los colores de los objetos capturados en las fotografías. Los desperfectos en las estacas, como

roturas, corrimiento de pintura, producto de condiciones ambientales y atmosféricas, también inciden en la correcta generación de resultados de este algoritmo.

Por cada imagen procesada, este algoritmo devuelve el valor real *score* y el valor entero *regiones*. El resultado *score* corresponde al puntaje asignado a la fotografía, determinado de acuerdo a la bondad del ángulo en el cual fue capturada la estaca. En caso de que la estaca no esté presente en la imagen o no aparezca en su totalidad el software determina un *score* de 0 para la fotografía. El valor *regiones* indica la cantidad de franjas azules de la estaca visibles en la fotografía. Se decidió almacenar los valores devueltos por este módulo en una base de datos para la generación y despliegue posterior de resultados a través de la interfaz web del sistema desarrollado. Por esta razón, se agregaron los atributos *sdetect* y *rdetect* a la tabla(clase) *Fotos* del sistema.

De acuerdo al valor *score*, el sistema selecciona la foto mejor puntuada de todas las obtenidas para cada estaca. Para la foto seleccionada, a partir del valor *regiones* y del número fijo y total de franjas pintadas (6), calcula la cantidad de regiones no pintadas de la estaca en cuestión. A su vez, el sistema utiliza el cálculo anterior y la altura visible de la estaca por encima del nivel del terreno, parámetro fijado en el sistema a 60 centímetros, para determinar una altura estimada de las pasturas que rodean cada estaca. Para el caso de uso Listado y procesamiento de imágenes, las fotografías obtenidas, los datos estadísticos registrados durante los vuelos y los valores resultantes de los cálculos descriptos previamente son presentados al usuario de manera organizada y agrupados por estaca y misión.



## 4 Calibración del dron

---

Como paso previo a la experimentación, se efectuó una calibración del dron. Para esto, fue necesario realizar desde etapas tempranas del proyecto, un número importante de pruebas para detectar y corregir errores de todo tipo en el sistema, así como vislumbrar mejoras, valiéndose del simulador o de vuelos reales con el UAV en campo abierto. Los resultados de estas pruebas, permitieron realizar ajustes en el sistema y en su programación para alcanzar de manera paulatina, versiones más estables del mismo y adecuadas a los requerimientos del proyecto. La calibración permitió determinar una configuración inicial de ajustes para el dron, así como conocer con mayor exactitud sus capacidades y autonomía.

### 4.1 *Parámetros especiales configurables*

A medida que se perfeccionaban las metodologías, la aplicación y se realizaban pruebas sobre el funcionamiento del dron, se incorporaron nuevos parámetros configurables. Con esto se buscó brindar mayores opciones al momento de definir los recorridos y las misiones, para evaluar distintas configuraciones y así determinar una solución que genere mejores resultados en términos de performance, posicionamiento del dron y detección de estacas. A continuación y en primer lugar, se describen los parámetros asociados a la técnica de mapping 3D.

#### **Solapamiento**

En una versión inicial del sistema, para la aplicación de mapping 3D, se consideró un solapamiento fijo de 50% entre foto y foto (0,5; representa un coeficiente de 50/100). Luego de las primeras verificaciones, donde se constata que el UAV responde satisfactoriamente frente a esta modalidad, se decidió ubicar el solapamiento como un valor configurable al momento de dar de alta el recorrido. Esto se hizo para poder experimentar con distintos valores para este parámetro, lo cual fue motivado por las sugerencias encontradas en tutoriales sobre topografías con drones que indican que para generar buenos resultados con esta metodología el porcentaje de solapamiento existente entre pares de imágenes debía ser superior al 70% [70].

#### **MovFotos**

Inicialmente para los vuelos de mapping 3D, la cámara tomaba una foto inmediatamente después que el dron alcanzaba la posición a fotografiar y se encontraba detenido. En una nueva versión de esta técnica, se planteó evaluar si existen mejoras en adquirir las imágenes en movimiento, en lugar de esperar que el UAV se detenga. Por esta razón se agregó el atributo *movfotos* a la clase *Misión* para determinar la condición de capturar fotos en movimiento o no.

Seguidamente, se describen los parámetros asociados a la técnica de procesamiento de imágenes.

#### **FotosxEstaca**

Originalmente, el número de fotos a ser adquiridas por estaca, para los de recorridos destinados a procesamiento de imágenes, era fijo e igual a 3. Sin embargo,

posteriormente se incorporó este parámetro dinámico para determinar que incidencia tiene el número de fotos que se tome sobre una estaca en la cantidad de aciertos en detectar dicha estaca en las fotos y en el tiempo consumido en completar los vuelos. Los posibles valores seleccionables para esta opción son 3, 4 o 5.

### CalcProximidad

Originalmente, para la captura de fotos con el dron, se fijó en el sistema un valor promedio de 1 m para la distancia  $DistE'$ , el cual fue deducido en función de lo desarrollado en la Sección 3.4.2. Cabe recordar que  $DistE$  corresponde a la distancia ideal que debe existir entre el UAV y la estaca para tomar una buena foto de la misma. Cabe aclarar, que este valor era igual para cualquier recorrido independientemente de su altura. Sin embargo, luego se decidió evaluar qué impacto tenía en los vuelos usar este valor por defecto, frente a aplicar el cálculo correcto de  $DistE$  en función de la altura seleccionada para el recorrido. De esta manera, surgió el parámetro *CalcProximidad* a nivel de recorrido. Un valor mayor que 0 para este parametro configura una distancia fija de  $DistE$ , de lo contrario se aplica el cálculo correcto.

### Umbral

El umbral de la distancia fue introducido en la Sección 3.6.3. Este representa el error de posicionamiento en metros permitido, en otras palabras, es la cota superior de la distancia de separación aceptable que puede existir entre el dron y una posición en cuestión para que el sistema entienda que ha sido alcanzada y permita que el vuelo continúe. En promedio, dado un umbral  $UmR$ , el dron se aproximará  $UmR/2$  al punto solicitado. En versiones iniciales del sistema, este valor estaba fijo en 30 centímetros para cualquier recorrido. Sin embargo, como se demuestra en la Sección 4.2, logró comprobarse que si se incrementa en algunos centímetros este valor, el UAV requiere menor tiempo de posicionamiento.

Esto condujo a considerar al umbral dentro de la realidad del problema, y a analizar qué impacto tendría su incremento en el correcto posicionamiento del dron. Por lo tanto, se replanteó la estrategia de movimiento descrita en la Sección 3.4.2. El cambio fundamental fue que las posiciones donde se deben de tomar las fotos fueron determinadas en función de un umbral  $UmR$  y un valor calculado  $DistE$  específicos para cada recorrido. Por lo tanto, dados estos valores, para cada trayecto de ida del UAV hacia una estaca, la primera posición de captura (segunda foto) se fijó a una distancia  $DistE - UmR/2$  de esta. Mientras que la tercera posición de captura, correspondiente a cada trayecto de partida desde la estaca, se fijó a una distancia respecto a esta de  $DistE + UmR/2$ . En otras palabras, como en realidad el dron se aproxima hasta una distancia de  $UmR/2$  metros para cada punto antes de cambiar de rumbo, la alternativa factible implementada consiste en alejar la posición de cada uno de ellos respecto del vehículo en  $UmR/2$  metros para lograr un posicionamiento correcto. Por lo tanto, se incorporó un parámetro *umbral* para definir los recorridos como se expresó anteriormente. Estos cambios más recientes se ven reflejados en los diagramas de clases y modelo entidad-relación de la Sección 3.6.2.

Para finalizar, se presenta un último parámetro que está relacionado con ambas metodologías aplicadas en este proyecto.

---

1 Ver la sección 3.4.1 del presente documento

## Resolución

La resolución es un opción que puede alterarse en cada vuelo, por lo que su valor se registra en la tabla *Misión* y permite seleccionar con qué resolución deben ser tomadas las fotos. El sistema maneja tres valores posibles, 1300 x 975, 2592 x 1944 y 3280 x 2464 pixeles, siendo ésta última la resolución máxima posible.

## 4.2 Vuelos de calibración en terreno de 50 m<sup>2</sup>

El primer escenario utilizado para realizar las pruebas de calibración fue una pequeña porción de terreno de 50 m<sup>2</sup>. En este lugar se colocaron 2 estacas ubicadas en las posiciones relativas en metros, (0 Norte, 5 Este) y (5 Norte, 0 Este) respecto del punto de partida (0,0). En la Figura 16 se representan las ubicaciones del punto de partida y de las estacas, utilizando un círculo grande y otros más pequeños, respectivamente. Estas pruebas se efectuaron durante dos días y se utilizaron a modo de puesta a punto del dron.

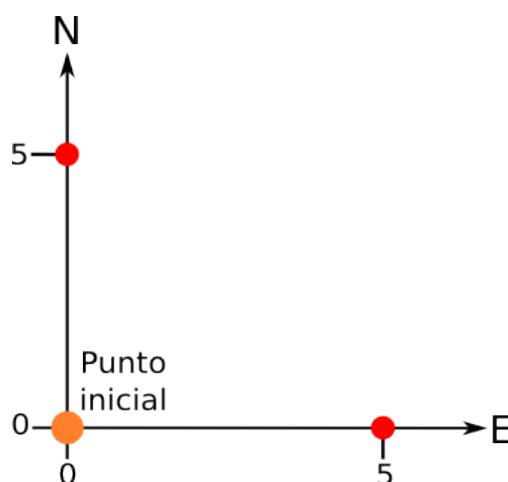


Figura 16: Coordenadas utilizadas para definir los recorridos sobre el terreno de 50 m<sup>2</sup>.

Específicamente, estas evaluaciones se centraron en analizar, probar y modificar la programación para intentar mejorar la detección de estacas en las fotos y entender el impacto que tienen los distintos parámetros de vuelo en esto. Durante las mismas, se realizaron pruebas con distintos tipos de recorrido de seguimiento de estacas, variando el parámetro de la cantidad de fotos a ser tomadas por estaca, además de la altura y la velocidad. A su vez, se programaron distintos recorridos de mapping 3D. Fueron recabados datos estadísticos de las misiones, para lograr aproximar los tiempos requeridos, de posicionamiento y captura de fotos sobre estacas, y de vuelo entre estas, para determinar así la usabilidad del sistema.

Durante la primera jornada se ensayaron 4 recorridos de seguimiento de estacas con el UAV utilizando configuraciones fijas de 5 para la cantidad de fotos por estaca<sup>1</sup> y de 1m para la distancia  $DistE^2$  entre el UAV y la estaca, adecuada para tomar la foto. Además, se definieron dos recorridos de mapping 3D.

1 Ver el parámetro FotosxEstaca en la sección 4.1 del presente documento.

2 Ver la sección 3.4.1 del presente documento.

Por cada tipo de recorrido definido se realizaron varios vuelos. Un subconjunto de ellos fue efectuado usando un valor fijo de 0,3m para el umbral<sup>1</sup>, mientras que en los restantes se aplicó 0,5 m para dicho parámetro. Los resultados promediales obtenidos utilizando el primer valor de umbral mencionado son presentados en la Tabla 5, mientras que los restantes son representados en la Tabla 6.

El tiempo total transcurrido se intentó estimar de forma lineal en función de la cantidad de fotos tomadas, la velocidad y la distancia aproximada a ser recorrida. El mismo fue subdividido en tiempo destinado a fotos (TeFs) y tiempo destinado a traslado del UAV entre puntos (TeT). A su vez, el tiempo destinado a fotos (TeFs) se calculó como  $\text{NumF} \cdot \text{TeXF}$ , donde NumF representa la cantidad de fotos obtenidas en la misión y TeXF es una variable independiente que indica la cantidad de tiempo que el dron invierte en tomar una única foto (este valor se dedujo de la práctica realizada en terreno). El tiempo de traslado (TeT), como es habitual, fue calculado con el cociente distancia sobre velocidad ( $\text{Dist}/\text{Veloc}$ ). La ecuación definitiva se presenta a continuación:

$$T_{\text{totE}} = \text{TeFs} + \text{TeT} \quad \text{o} \quad T_{\text{totE}} = \text{NumF} \cdot \text{TeXF} + \text{Dist}/\text{Veloc}.$$

En las tablas 5 y 6, se observan los valores medidos y los resultados de evaluar esta función para cada tipo de recorrido. La diferencia entre tiempo medido y estimado corresponde al campo DifT. En la Tabla 5, se utilizó el valor 7 para TeXF porque es el que mejor se ajusta, ya que logra minimizar a DifT. Por su parte, en la Tabla 6 se utilizó el valor 5 para dicho campo por la misma razón. En ambas tablas mencionadas y para las misiones del tipo mapping 3D se utilizó el carácter '-' para el campo Vest indicando que estos valores no corresponden a esta modalidad.

| IDR        | Tipo           | Alt (m)  | Veloc (m/s) | Umr (m)    | Dist (m)  | NumF      | Vest     | TeXF (s) | TeFs (s)  | TeT (s)  | TtotE (s) | Tmed (s)   | DifT (s)  |
|------------|----------------|----------|-------------|------------|-----------|-----------|----------|----------|-----------|----------|-----------|------------|-----------|
| 300        | Estacas        | 3        | 1           | 0,3        | 21        | 10        | 6        | 7        | 70        | 21       | 91        | 105        | 14        |
| 302        | Estacas        | 5        | 1           | 0,3        | 21        | 10        | 7        | 7        | 70        | 21       | 91        | 99         | 8         |
| 303        | Estacas        | 3        | 6           | 0,3        | 21        | 10        | 4,5      | 7        | 70        | 4        | 74        | 94         | 21        |
| <b>305</b> | <b>Estacas</b> | <b>5</b> | <b>6</b>    | <b>0,3</b> | <b>21</b> | <b>10</b> | <b>9</b> | <b>7</b> | <b>70</b> | <b>4</b> | <b>74</b> | <b>100</b> | <b>27</b> |
| 306        | Mapping        | 4        | 1           | 0,3        | 15,2      | 6         | -        | 7        | 42        | 15       | 57        | 46         | -12       |
| 307        | Mapping        | 5        | 6           | 0,3        | 5,38      | 3         | -        | 7        | 21        | 1        | 22        | 22         | 0         |
| 308        | Mapping        | 3        | 6           | 0,3        | 21,7      | 13        | -        | 7        | 91        | 4        | 95        | 97         | 2         |

Tabla 5: Primera jornada de vuelos realizada en terreno de 50 m<sup>2</sup> con Umr=0,3 m.

Referencias:

- IDR: Identificador del recorrido (se utilizó para esto el dato del padrón)
- Tipo: Tipo del recorrido
- Alt: Altura del recorrido medida en metros
- Veloc.: Velocidad del recorrido medido en m/s.
- Umr: Valor en metros comprendido entre 0 y 1 que indica el umbral o error de posicionamiento aceptable del dron.
- Dist: Promedio en metros de las distancias aproximadas recorridas por el dron.
- FxE: Cantidad de fotos capturadas por estaca
- NumF: Cantidad de fotos obtenidas en las misiones
- Vest: Cantidad promedial de imágenes de la misiones donde es visible la estaca

<sup>1</sup> Ver el parámetro Umbral en la sección 4.1 del presente documento.

- TeXF: Tiempo estimado en segundos dedicado a captura de una foto (incluyendo retardos en el posicionamiento en la ubicación exacta)
- TeFs: Cálculo del tiempo estimado en segundos dedicado a capturar todas las fotografías de la misión
- TeT: Tiempo estimado en segundos dedicado al traslado del dron entre estacas.
- TTotE: Tiempo total estimado en segundos de realización de la misión.
- TMed: Promedio en segundos del tiempo medido para los distintos vuelos.
- DifT: Diferencia de tiempo en segundos entre el tiempo medido y el tiempo estimado.

| IDR | Tipo    | Alt (m) | Veloc (m/s) | Umr (m) | Dist (m) | NumF | Vest | TeXF (s) | TeFs (s) | TeT (s) | TtotE (s) | Tmed (s) | DifT (s) |
|-----|---------|---------|-------------|---------|----------|------|------|----------|----------|---------|-----------|----------|----------|
| 302 | Estacas | 5       | 1           | 0,5     | 21       | 10   | 8    | 5        | 50       | 21      | 71        | 88       | 17       |
| 305 | Estacas | 5       | 6           | 0,5     | 21       | 10   | 8    | 5        | 50       | 4       | 54        | 62       | 8        |
| 306 | Mapping | 4       | 1           | 0,5     | 15,2     | 6    | -    | 5        | 30       | 15      | 45        | 48       | 3        |
| 308 | Mapping | 3       | 6           | 0,5     | 21,7     | 13   | -    | 5        | 65       | 4       | 69        | 61       | -8       |

Tabla 6: Primera jornada de vuelos realizada en terreno de 50 m<sup>2</sup> con Umr=0,5 m.

El resultado más evidente de estas experiencias es que los tiempos fueron menores para los vuelos que utilizaron un umbral de 0,5 metros. Esta comprobación indica que la aplicación de este parámetro permite una disminución del tiempo invertido por el dron en ajustarse a la posición exacta en la cual debe tomarse la foto. Lo expresado pudo comprobarse visualmente en el campo, pero también queda reflejado en los valores de TeXF que mejor se ajustan para cada caso.

Otro resultado claro que se aprecia a partir de los valores presentados en las tablas, es que a una altura mayor de vuelo (5m) se captan mejor las estacas en las fotos, y que tras el aumento de velocidad el UAV no necesariamente consume menos tiempo en trasladarse. En general, la tasa de aciertos de estaca en foto, (Vest) es buena pero no la mejor, además los tiempos totales medidos son bastante altos. Si bien se observaron mejorías para un umbral de 0,5, un valor de 5 segundos (TeXF) necesarios para que el UAV se ajuste a la posición donde tiene que sacar la foto y la tome, representa un porcentaje de consumo elevado teniendo en cuenta la autonomía del dron.

Además, a partir del análisis visual realizado durante estas pruebas, se pudo apreciar claramente que los ajustes en la posición GPS que recibe el dron hacen que aterrice, en el peor de los casos, a un metro de su punto de despegue (el mismo desajuste ocurre con las estacas). Se comprueba además que en tramos cortos, el dron no logra alcanzar la velocidad solicitada, por lo que los tiempos de traslado estimado presentados en las tablas anteriores son muy aproximados.

A partir de estos resultados, se decidió perfeccionar la programación para adecuar la distancia en la cual tomar la foto de la estaca contemplando la altura de vuelo definida por el usuario y basándose en el Modelo matemático de captura de fotos presentado en la Sección 3.4. Cabe recordar, que en el sistema hasta el momento esto se manejaba como un valor fijo por defecto de 1 m. Además, de aquí en más se decidió considerar el umbral como un parámetro configurable más de los recorridos, utilizar valores para este mayores o iguales que 0,5 para disminuir los tiempos totales de vuelo, y comenzar a tener en cuenta este valor en la estrategia de

movimiento del dron.

Considerando que la tasa de aciertos de estacas en foto no era mala y teniendo en cuenta que a los efectos de detectar el nivel de la pasturas entorno a una estaca, con una sola foto de esta era suficiente, se decidió evaluar recorridos que tomen menor cantidad de fotos por estaca como una forma de mitigar el tiempo total de vuelo.

Posteriormente, durante la segunda jornada se ensayaron 5 nuevos recorridos todos del tipo seguimiento de estacas, tomando 3 y 5 fotos por estaca<sup>1</sup>. Para medir el impacto real de las mejoras realizadas a través los resultados obtenidos, en esta oportunidad se probaron configuraciones que consideran el umbral<sup>2</sup> en la estrategia de posicionamiento frente aquellas que no lo hacen, así como aquellas que establecen la proximidad<sup>3</sup> a la estaca en 1m para tomar las fotos, contra las que seleccionan el cálculo correcto de acuerdo a la altura.

Por cada tipo de recorrido definido, se realizaron 3 misiones. En su totalidad, los vuelos fueron efectuados a una altura de 5 m y teniendo en cuenta un umbral de 0,5. Los resultados promediales obtenidos pueden ser observados en la Tabla 7. A diferencia de las tablas anteriores, en esta se agrega la columna VelocR que representa la velocidad relativa promedio en m/s que alcanzó el UAV durante su recorrido. Es de interés calcular este dato para ver si se aproxima a la velocidad ideal Veloc seleccionada.

| IDR | Veloc (m/s) | Cpro | Cum | FxE | NumF | Vest | Tmed (s) | Dist (m) | Bat (%) | Veloc R(m/s) |
|-----|-------------|------|-----|-----|------|------|----------|----------|---------|--------------|
| 367 | 6           | 0    | 1   | 3   | 6    | 6    | 32       | 18       | 2,5     | 0,6          |
| 368 | 6           | 0    | 0   | 3   | 6    | 5    | 33       | 18       | 3       | 0,5          |
| 361 | 6           | 0    | 1   | 5   | 10   | 9,2  | 60       | 27       | 4       | 0,4          |
| 362 | 6           | 0    | 0   | 5   | 10   | 9    | 54       | 25       | 4       | 0,5          |
| 363 | 6           | 1    | 0   | 5   | 10   | 9    | 64       | 25       | 5       | 0,4          |

Tabla 7: Segunda jornada de vuelos realizada en terreno de 50 m<sup>2</sup>.

Referencias:

- Cpro: Valor que configura la distancia que debe aproximarse<sup>2</sup> el dron a una estaca para tomar una foto. Un valor mayor que 0 configura una distancia fija, de lo contrario se aplica el cálculo de proximidad en función de la altura.
- Cum: Valor booleano que indica si el umbral fue tenido en cuenta en los cálculos de posicionamiento.
- Bat: Porcentaje de batería consumido por el UAV durante el vuelo
- VelocR: Velocidad relativa promedio alcanzada por el UAV medida en m/s y calculada mediante el cociente Dist/Tmed.

De acuerdo estos resultados, el grupo de recorridos 367 y 368, con FxE (cantidad de fotos por estaca) igual a 3, emplean tiempos similares, al igual que sucede con el grupo configurados con FxE en 5 formado por 361, 362, 363. Sin embargo, la diferencia del tiempo empleada entre estos dos grupos es notoria. El recorrido con identificador 367 demora en promedio y aproximadamente la mitad que 361.

1 Ver el parámetro FotosxEstaca en la sección 4.1 del presente documento.

2 Ver el parámetro Umbral en la sección 4.1 del presente documento.

3 Ver el parámetro CalcProximidad en la sección 4.1 del presente documento.

Como todos los vuelos se realizaron a una altura de 5 m, no se registraron grandes diferencias en la tasa de aciertos Vest entre el vuelo 363 y los vuelos 361 y 362 debido a que los cálculos aplicados para esta altura determinan una distancia de proximidad en torno a 1m para tomar la foto. De todas formas, en caso de que se requiera en el futuro la realización de recorridos a otras alturas, en el sistema se conservará la opción de determinar de forma dinámica la distancia de proximidad *DistE*<sup>1</sup>.

Por otra parte, se observa una leve mejoría en la tasa de aciertos Vest para los recorridos 367 y 361 (en los que se tuvo en cuenta el umbral para la estrategia de movimiento), respecto a los restantes. De aquí en mas, se trabajará con configuraciones que consideren el umbral en sus recorridos.

Por otro lado, la baja velocidad relativa obtenida (VelocR) se explica porque el dron debe avanzar y detenerse varias veces en el corto trayecto (de 20 m promedio) en el que se le solicita moverse.

Por último, con el fin de estimar los rendimientos, se generaron resultados estadísticos sobre la totalidad de los vuelos efectuados. De esto se desprende, que el dron debió invertir 9 minutos y utilizar 42% de batería para lograr desplazarse aproximadamente 336 metros. Esto indica que para el escenario presentado, que incluye la recorrida por cada estaca (trayectos cortos) y la toma de fotografías, con una carga completa de batería y a una velocidad de 6 m/s, el dron puede volar 800 metros en 21 minutos. En particular, para dicho escenario, se concluye que se consumió más tiempo en la captura de fotos que en el traslado del dron.

---

<sup>1</sup> Ver el la sección 4.3.1 del presente documento.

## 5 Experimentación

---

Esta sección presenta el conjunto de evaluaciones experimentales documentadas que se efectuaron una vez que se contaba con una versión estable del sistema con todas sus funcionalidades implementadas y con el dron calibrado. Para el cumplimiento de etapa además se contaba con un mayor conocimiento de las capacidades y la autonomía del UAV.

Para validar la correctitud del sistema y aplicar mejoras que beneficien la performance de los recorridos y la aplicación de las distintas metodologías, se tomó la decisión de realizar experimentos sobre un espacio de aplicación real. Por este motivo, se coordinó el trabajo sobre un potrero ubicado en la Estación Experimental Mario. A. Casinoni (EEMAC), donde los espacios de aplicación son más grandes y por lo tanto los recorridos son más extensos, permitiendo hacer más notorios los detalles, ventajas y desventajas de distintas configuraciones y el estudio de indicadores de rendimiento sobre situaciones reales. El potrero La Crianza ubicado en dicha estación fue seleccionado como área de estudio para la realización de pruebas de mayor magnitud. Este potrero es un campo natural restablecido que cuenta con pasturas cortas, dispersas y de diverso tipo y no está controlado. Además, las evaluaciones experimentales sobre el mismo se realizaron en verano, en un momento en el que el pasto estaba totalmente comido. Para los experimentos, se colocaron 30 estacas en el lugar asignado, de acuerdo a lo conversado con el grupo de estudiantes de agronomía. Cabe aclarar, que se registraron las posiciones de las estacas utilizando un GPS Garmín, para posteriormente definir recorridos sobre ellas en el sistema. En esta nueva fase, para validar una configuración y ponderarla por encima de las demás, se utilizaron resultados estadísticos generados mediante la realización de varias pruebas sobre una mismo tipo de recorrido.

### ***5.1 Experimentación con 10 estacas***

Con el objetivo de disminuir el tiempo empleado en los vuelos, tendiendo a minimizar TeXF y basándonos en los resultados obtenidos hasta el momento que demuestran el claro impacto del valor del umbral en esto, se preparan tres nuevas configuraciones de recorridos con las posiciones de 10 estacas colocadas en este potrero. Para estos recorridos se consideraron los valores 0,5, 0,7 y 1 para el umbral. De esta manera, usando valores mayores a 0,5 para este parámetro, se prevé que la fotos se capturen mientras el dron esté en movimiento en el aire, y no cuando este se encuentre detenido sobre la posición solicitada. La intención fue asignar una mayor calificación a aquellos recorridos para los que las estacas se detectaran mejor, buscando de esta forma que la calidad de las fotografías no se viera afectada.

Cuando se realizaron estos experimentos, el sistema en producción contaba con un módulo de procesamiento de imágenes para detección de estacas<sup>1</sup> integrado, el cual fue desarrollado por el departamento de Ingeniería Biológica. Hasta el momento la determinación de la tasa de aciertos de fotos en estaca (Vest) se realizaba de forma manual, indagando una a una cada foto. Sin embargo, para el despliegue de

---

<sup>1</sup> Ver la sección 3.6.3 de este documento.



resultados generados por estas misiones se recurrió al módulo mencionado para evitar posibles errores humanos en la calificación de múltiples fotos.

Para todos los recorridos se usó la misma altura, velocidad y número de fotos por estaca, definiendo estos valores en 5 m, 6 m/s y 3 respectivamente. Se ejecutaron 5 vuelos con el UAV, por cada tipo de recorrido definido. En la Tabla 8 se recogen los valores promediales resultantes de las actividades realizadas en estas jornadas.

| IDR | Umr (m) | NumF | Vest | F/E | ScoP | Tmed (s) | Dist (m) | Bat (%) | Veloc R(m/s) |
|-----|---------|------|------|-----|------|----------|----------|---------|--------------|
| 867 | 0,5     | 30   | 17   | 0,6 | 0,21 | 153      | 180      | 12,8    | 1,2          |
| 868 | 0,7     | 30   | 13   | 0,4 | 0,18 | 124      | 191      | 10,4    | 1,5          |
| 869 | 1       | 30   | 14   | 0,5 | 0,20 | 112      | 191      | 9,7     | 1,7          |

Tabla 8: Experimentación con 10 estacas en un potrero.

Referencias:

- F/E: Relación entre el número de fotos NumF y la tasa de aciertos de estacas Vest.
- ScoP: Es el score o calificación promedia asignada a las fotos obtenidas. Este junto con el valor Vest son promedios de la salidas generadas por el algoritmo de procesamiento de imágenes para detección de estacas.

De los resultados, se desprende que promedialmente se captan mejor las estacas usando un umbral de 0,5 m, lo que se ve reflejado en los valores Vest y ScoP para el recorrido 867. Respecto a la configuración más rápida, identificada como 869, la diferencia con la más precisa mencionada anteriormente radica en 30 segundos extra de tiempo y 3 % extra de batería. Si bien el tiempo de 867 representa 36% más del requerido por 869, una diferencia de 3% de batería no es significativa como para preferir a 869 por sobre las demás, debido a que se pierde precisión en la visualización de estacas en las fotos, lo cual es necesario para lograr cumplir el objetivo de este proyecto que es medir disponibilidad de las pasturas.

Cabe aclarar que los experimentos descriptos fueron realizados con la cámara color. Posteriormente, se realizaron nuevos vuelos bajo estas mismas configuraciones pero utilizando la cámara infrarroja, a partir de los cuales se obtuvieron valores muy similares a los presentados en la Tabla 8. Estos resultados se consideraron concluyentes por lo que de aquí en adelante, siempre se utilizará un valor de 0,5 para el parámetro del umbral en los subsiguientes experimentos.

## 5.2 Experimentación con 30 estacas

Una vez ajustadas las configuraciones de vuelo para la aplicación de la modalidad de procesamiento de imágenes, se definió un nuevo recorrido con las posiciones de las 30 estacas clavadas en el campo. Para el mismo se especificó una altura de 5m, una velocidad de 6m/s, un umbral de 0,5 y un número de fotos por estaca de 3.

Cabe aclarar, que los experimentos de esta modalidad, incluido este, fueron realizados hasta el momento con una resolución de 1300x975 pixeles, valor que se consideró adecuado dada la baja altura de vuelo seleccionada. La utilización de este valor tiene como beneficio la disminución de los tiempos de vuelo, ya que la captura de una fotografía con esta resolución demora 0,7 s menos del tiempo requerido si se

utilizara la máxima resolución. Esta elección también permitió disminuir los tiempos y el consumo de recursos necesarios para el procesamiento de imágenes.

Para la efectividad de la aplicación de esta metodología, es fundamental no perder la referencia de la ubicación donde se encuentran las estacas, una vez que sus posiciones GPS han sido cargadas al sistema. Para evitar que esto suceda se incrustaron varillas metálicas de 40 cm en el campo, de una forma que impidiera su retiro.

Para este recorrido, se realizaron 3 vuelos con el UAV, utilizando la cámara a color y la mencionada resolución. En la Tabla 9 se presentan los promedios de los valores estadísticos obtenidos durante estos vuelos.

| IDR | Umr<br>(m) | NumF | Vest | F/E | ScoP | Tmed<br>(s) | Dist<br>(m) | Bat<br>(%) | Veloc<br>R(m/s) |
|-----|------------|------|------|-----|------|-------------|-------------|------------|-----------------|
| 877 | 0,5        | 90   | 56   | 0,6 | 0,26 | 384         | 472         | 34         | 1,2             |

Tabla 9: Experimentación con 30 estacas en un potrero.

Estos resultados evidencian que el algoritmo de procesamiento detectó la estaca en el 60% de las fotos, además de que fue consumido un 34% de batería para culminar el vuelo.

Independientemente de lo anterior, los indicadores presentados hasta el momento no son útiles para determinar si la metodología de procesamiento de imágenes es efectiva para estimar disponibilidad o no. Para esta primera instancia de vuelos con 30 estacas se seleccionaron algunas fotos para hacer un análisis mas detallado con el objetivo verificar que tan preciso es el algoritmo de procesamiento de imágenes en la determinación del número franjas cubiertas por las pasturas para cada estaca. Para llegar a un veredicto, los valores obtenidos se compararon con datos reales surgidos de la observación de las fotos.

Para este estudio se ajustaron los parámetros del algoritmo para obtener resultados que se aproximen lo más posible a la realidad. De 11 fotos procesadas con la configuración más adecuada, el número de franjas detectadas por el algoritmo solo fue correcto en 1 caso, mientras que se registraron diferencias respecto a las mediciones visuales, de 1 o 2 franjas para 3 fotos, de 3 o 4 para 3 fotos y de 6 o 5 para las restantes. Una porción de una de estas fotos se presenta en la Figura 17.

Como el algoritmo no funcionó como se esperaba, de aquí en más para esta modalidad se decidió utilizar la máxima resolución (3280 x 2464 pixeles) de la cámara para favorecer el procesamiento del algoritmo, ya que se pudo apreciar que algunas regiones de la estaca se ven muy pequeñas desde arriba. De esta manera se buscó que las regiones quedaran representadas en las fotografías por áreas de pixeles más grandes. Para verificar esto, con el dron se tomaron nuevas fotografías con la mencionada resolución que permitieron generar mejores resultados. Concretamente, para 11 de estas fotografías, el número de franjas detectadas por el algoritmo fue correcto en 2 casos, mientras que se registraron diferencias respecto a las mediciones visuales, de 1 franja para 6 fotos y de 3 franjas para las restantes.



Figura 17: Porción de foto tomada con el UAV sobre una de las estacas.

### ***5.3 Mapping 3D para alturas iguales o menores a 20 metros***

Para la aplicación de la modalidad mapping 3D, hasta el momento el nivel de solapamiento utilizado entre fotos era de 0,5. Sin embargo, al ver que distintos tutoriales aconsejaban la utilización de un valor de 0,8 para este parámetro para lograr la obtención de buenos resultados con esta técnica [70], se propuso comparar rendimientos y modelos resultantes de utilizar ambos valores para distintos vuelos.

Además, el mecanismo utilizado hasta el momento para la captura de fotos era dependiente del posicionamiento del dron. De esta manera, una determinada foto solo podía ser tomada, una vez que el dron estuviese ubicado sobre la posición indicada para esta acción y no mientras éste estuviese trasladándose. Por lo tanto, en la búsqueda de mejorar la performance de esta técnica, se decidió implementar y probar un mecanismo para tomar fotos mientras el dron se encontrara en movimiento. Para evaluar las ventajas y desventajas de estas modificaciones, los resultados obtenidos fueron contrastados con los obtenidos por el mecanismo implementado previamente.

Para habilitar el mecanismo de captura de fotos en movimiento fue necesario disminuir la velocidad de vuelo, de lo contrario algunas fotos no serían capturadas. Por lo tanto, para realizar estos experimentos, se definieron nuevas combinaciones de recorridos optando entre tomar fotos en movimiento o no, para alturas de 10 y 20 metros, velocidad de 2 y 6 m/s y niveles de solapamiento de 0,5 y 0,8.

Para estas pruebas, se seleccionó un sector del potrero de aproximadamente 900 m<sup>2</sup> (30 x 30) que representa casi un séptimo de la porción del terreno ocupada por las 30 estacas (6000 m<sup>2</sup>). Se eligió esta pequeña área para que fuera posible en dos jornadas completar todas las pruebas planificadas teniendo en cuenta las baterías disponibles. También se buscaba disminuir la cantidad de fotos tomadas para agilizar

la generación y comparación de modelos 3D obtenidos. Para estos experimentos se utilizó la cámara a color.

Estas instancias fueron propicias para evaluar los desempeños de las versiones 2 y 4 de la caja contenedora del módulo de control aéreo frente a los mismos tipos de recorridos. La idea era comparar los resultados obtenidos con ambas versiones, para determinar si el diseño aerodinámico propuesto con la versión 4 efectivamente favorecía la reducción del consumo de tiempo y batería.

En la Tabla 10, se presentan los resultados promedio de los valores estadísticos obtenidos durante los vuelos realizados, agrupados por tipo de recorrido y por versión de caja contenedora.

| IDR  | Vel<br>(m/s) | Alt<br>(m) | Solp | MovF | Num<br>F | Dist<br>(m) | Versión 2   |            | Versión 4   |            |
|------|--------------|------------|------|------|----------|-------------|-------------|------------|-------------|------------|
|      |              |            |      |      |          |             | Tmed<br>(s) | Bat<br>(%) | Tmed<br>(s) | Bat<br>(%) |
| 1065 | 6            | 10         | 0,5  | 0    | 37       | 199         | 258         | 20         | 222         | 20         |
| 1025 | 2            | 10         | 0,5  | 1    | 37       | 200         | 185         | 15         | 173         | 16         |
| 2065 | 6            | 20         | 0,5  | 0    | 10       | 120         | 100         | 8          | 96          | 9          |
| 2025 | 2            | 20         | 0,5  | 1    | 10       | 120         | 108         | 9          | 103         | 9          |
| 2068 | 6            | 20         | 0,8  | 0    | 50       | 222         | 270         | 21         | 240         | 22         |
| 2028 | 2            | 20         | 0,8  | 1    | 50       | 219         | 217         | 19         | 182         | 17         |

Tabla 10: Aplicación de mapping 3D para alturas menores o iguales a 20 metros.

Referencias:

- Solp: Es el nivel de solapamiento entre fotos.
- MovF: Un valor de 1 indica que las fotos fueron capturadas en movimiento, mientras que un valor de 0 indica lo contrario.

En primer lugar, de estos resultados se desprende que si bien los tiempos empleados por los vuelos fueron menores para la versión 4 de la caja contenedora, los consumos de batería con esta caja fueron iguales o mayores que los empleados por la versión 2. Los tiempos menores registrados para la versión 4 se explican porque su diseño es más aerodinámico que el otro, lo cual facilitó y favoreció al traslado del dron entre puntos. Por otro lado la versión 4 registró mayor consumo de batería porque es la más pesada de la dos. Esto se pudo comprobar, al ver que el dron, cuando iba equipado con esta caja, requería mucho más esfuerzo para mantenerse en el aire mientras se tomaba una foto. A pesar de todo esto, en el peor de los casos, la versión 4 solo gastó 2% de batería más respecto a la versión 2.

En segundo lugar, para pares de recorridos definidos a la misma altura y con un mismo nivel solapamiento pero que difieren únicamente en la opción de capturar fotos en movimiento o no (MovF), las diferencias en los rendimientos de batería son de 5%, en el peor de los casos. Por esta razón, se decidió descartar a este tipo de configuraciones, ya que no ofrecen grandes mejoras al rendimiento y a su vez pueden afectar la calidad de las fotos obtenidas.

En tercer lugar, los tiempos y consumos de batería requeridos para la realización de vuelos a 20 metros y con un nivel de solapamiento de 0,8 constituyen valores importantes teniendo en cuenta las baterías disponibles y el tamaño del área

cubierta. Teniendo en cuenta que la zona ocupada por estacas es casi 7 veces mas grande que el área mapeada por el recorrido 2068, se estimó que se necesitarían un nivel de 140% de batería para cubrir el área de interés completa. Es decir, se necesitaría más de una batería.

A partir de las fotografías obtenidas se generaron modelos 3D con ArGiSoft Photoscan, utilizando en algunos casos un punto de apoyo y en otros ninguno. El punto de apoyo considerado fue la posición de partida de los recorridos. Los resultados fueron distintos para diferentes alturas y niveles de solapamiento involucrados.

Se pudo apreciar que los modelos generados para misiones con solapamiento 0,8 se ajustaban más a la realidad de las pasturas del potrero, en relación a los generados para misiones con 0,5, las cuales tenían un menor nivel de detalle. Por esto se consideró conveniente adoptar a 0,8 como el valor adecuado de solapamiento para vuelos futuros. Además se pudo observar que utilizando puntos de control, los resultados obtenidos eran distintos a los casos en los que no se usaran. En los casos donde se usó un punto de apoyo, se lograron menores diferencias en el nivel del terreno lo cual coincide con la realidad de esa zona del potrero. Al comprender su importancia, se decidió evaluar el uso de más puntos de apoyo con este técnica.

Debido a los resultados y proyecciones obtenidas, se decidió realizar experimentos a mayores alturas para comparar resultados. Para determinar los modelos más aproximados, se entendió necesario validarlos con técnicas de estimación del tipo agronómico, las cuales serían utilizadas para las últimas evaluaciones experimentales documentadas en este trabajo.

### ***5.4 Mapping 3D para alturas iguales o mayores a 20 metros***

Para determinar las alturas superiores adecuadas a ser empleadas para mapeos del terreno, se calcularon para distintos valores, las precisiones obtenidas al capturar fotografías con la máxima resolución. Para 30 y 40 metros de altura, se obtuvieron precisiones de 1 y 1,4 cm/pixel respectivamente, valores que se consideraron adecuados para esta técnica dada la altura de las pasturas presentes en el potrero. Por lo tanto, se seleccionaron estas alturas para definir nuevas configuraciones de recorrido, empleando un nivel de solapamiento de 0,8 y una velocidad 6m/s.

Para estos experimentos, se decidió incorporar 3 puntos de apoyo para el modelado del área de 900 m<sup>2</sup> y 6 para el área total de 6000 m<sup>2</sup>. Para su referenciación en el potrero se utilizaron marcas de distintos colores, para que los puntos fuesen fácilmente distinguibles ya que las fotografías obtenidas son muy homogéneas entre si. Estas fueron estratégicamente distribuidas y colocadas sobre estacas ubicadas próximas a los limites de la mencionada área.

Se realizaron vuelos para las configuraciones especificadas. Con la idea de comparar resultados obtenidos para alturas de 20 metros y debido a la incorporación de puntos de apoyo, fue necesario realizar una nueva misión para el recorrido 2068 definido anteriormente. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 11.

| IDR  | Alt (m) | NumF | Dist (m) | Tmed (s) | Bat (%) |
|------|---------|------|----------|----------|---------|
| 2068 | 20      | 50   | 221      | 252      | 22      |
| 3068 | 30      | 30   | 200      | 177      | 18      |
| 4068 | 40      | 10   | 97       | 92       | 7       |

Tabla 11: Primera aplicación de mapping 3D para alturas mayor o iguales a 20 metros.

En estos resultados se puede ver claramente como el tiempo de vuelo y los niveles de batería consumidos dependen del número de fotos que tome el dron. A mayor altura, menos fotos serán necesarias para cubrir el área, menor niveles de batería serán consumidos, pero se perderá precisión en las fotos y modelos obtenidos.

A partir de los datos obtenidos, se generaron distintos modelos a través de las herramientas ArgySoft PhotoScan y QGis para cada una de las alturas seleccionadas, variando la cantidad de puntos de apoyo (0, 1, 2 o 3). Para conocer el grado de error de los modelos generados, se utilizó como verificador la herramienta Google Earth [83] ya que al momento no se contaba con medidas obtenidas por métodos tradicionales que pudieran ser de ayuda. Para el área de 900 m<sup>2</sup> del potrero, los mapas satelitales de esta herramienta indican que las variaciones del nivel de este terreno están en un rango de 2 metros comprendido entre 49 y 51 metros de altura por encima del nivel del mar. Mediante estas referencias y conociendo que en el área de trabajo, la altura de las pasturas está muy por debajo a 1 m, fue posible determinar si los DSM generados tenían errores muy grandes o no. Para cada tipo de recorrido, los valores máximos y mínimos de elevación de los DSM se presentan en la Tabla 12. Las filas de color mas oscuro indican los modelos que presentaron mayores errores.

| IDR  | Npa | minDSM (m) | maxDSM (m) |
|------|-----|------------|------------|
| 4068 | 0   | 49         | 54         |
| 4068 | 1   | 49         | 52         |
| 4068 | 2   | 49         | 52         |
| 4068 | 3   | 39         | 58         |
| 3086 | 1   | 49         | 54         |
| 3086 | 2   | 49         | 52         |
| 3086 | 3   | 33         | 70         |
| 2086 | 1   | 49         | 53         |
| 2086 | 2   | 49         | 52         |

Tabla 12: Niveles de elevación de superficie máximos y mínimos para los DSM generados.

Referencias:

- Npa: Número de puntos de control empleados
- minDSM: valor mínimo de elevación registrado en el DSM
- maxDSM: valor máximo de elevación registrado en el DSM

Si bien la utilización de puntos de control permite mejorar la precisión de los modelos generados, con estos resultados se pudo comprobar que el número y la correctitud en la georeferenciación de los puntos de control empleados pueden cambiar



drásticamente los DSM obtenidos. En este sentido, es fundamental contar con una buena precisión del receptor GPS empleado para determinar las coordenadas de estos puntos. Teniendo en cuenta que se dispone de receptores GPS comunes, con un importante grado de error, y considerando los valores de la Tabla 12 que mas se ajustan con los ofrecidos por la herramienta empleada, se decidió que para los experimentos venideros se usarían como máximo dos puntos de apoyo por cada foto. Estos serían ubicados en posiciones distintas a las de las estacas con motivo de no cubrir las pasturas entorno a las mismas, las cuales constituyen las áreas específicas sobre las cuales se se desean comparar las distintas metodologías.

A partir de los DSM contruidos mediante 2 puntos de apoyo, se generaron los modelos DTM y CHM correspondientes. Para cada tipo de recorrido en la Tabla 13 se presentan los valores de elevación del terreno máximos y mínimos registrados en los DTM. En la misma grilla se incorporan los valores máximos, mínimos y promedios de las alturas del forraje del área mapeada, obtenidos a partir de cada CHM.

| IDR  | minDTM<br>(m) | maxDTM<br>(m) | minCHM<br>(m) | maxCHM<br>(m) | medCHM<br>(m) |
|------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| 4068 | 49            | 52            | -0,7          | 4,2           | 0,2           |
| 3086 | 49            | 52            | -3,0          | 6,9           | 0,1           |
| 2086 | 49            | 52            | -9,4          | 6,0           | -9,7          |

Tabla 13: Niveles de la altura máximos y mínimos los CHM y DSM generados.

Referencias:

- minDTM: valor mínimo de elevación registrado en el DTM
- maxDTM: valor máximo de elevación registrado en el DTM
- minCHM: valor máximo de altura de pasto registrado en el CHM
- maxCHM: valor máximo de altura de pasto registrado en el CHM

Para los DTM generados para 20, 30 y 40 metros de altura no existen diferencias en los valores calculados y presentados en la Tabla 13. Es otra la situación para los CHM. Los valores tan altos registrados para la altura del pasto, tiene que ver con la presencia de un árbol en el potrero. Por otro lado, los niveles por debajo del cero tienen que ver con errores provenientes de la generación de los DSM y DTM. Por esta razón, para los siguientes experimentos se tuvo en cuenta depurar los modelos generados. Para esto, se debe recortar mediante Qgis, las porciones del modelo que introducen estos errores, las cuales frecuentemente están alojadas en los extremos.

## 5.5 Últimos experimentos y verificación de resultados

En esta sección se presentan los últimos experimentos realizados sobre el potrero seleccionado, en el marco de este proyecto. El objetivo de estos fue validar los modelos y resultados generados por las distintas metodologías introducidas en este trabajo, frente a los obtenidos de la aplicación de técnicas agronómicas. Desde el punto de vista tecnológico, mediante la realización de estas pruebas se pretendía determinar qué combinaciones de tipos de cámara y metodología aplicada son la más adecuadas para lograr la obtención de resultados precisos en términos de estimación de disponibilidad. Para estos estudios, se consideró la totalidad del área

cubierta por las estacas ( $6000 \text{ m}^2$ ). Cabe aclarar que a corto plazo, cuando las pasturas estén más altas se harán otros experimentos en este potrero.

En estos experimentos se cambiaron de lugar algunas estacas para ubicarlas en zonas de mayor volumen de forraje. A partir de la inspección de las pasturas que rodean a cada estaca, se determinaron 5 niveles de altura de pasto distintos a ser considerados. De esta forma, se le asignó a cada estaca un determinado punto de la escala visual, junto con una altura estimada. Esta categorización sirvió para llevar adelante las comparativas posteriores al procesamiento de datos.

Por otro lado, para la aplicación de la técnica de mapping 3D, fueron colocadas marcas de distintos colores en el campo para simbolizar 6 puntos de apoyo. Estas fueron distribuidas próximas a los extremos del contorno de la zona cubierta por las estacas. Se tuvo en cuenta alejar lo suficiente a los puntos de apoyo de las estacas para evitar cubrir las pasturas entorno a estas, las cuales constituyen las áreas específicas de estudio. Esto implicó que se debieran tomar las posiciones de las estacas (nuevamente) y de los puntos de control mediante un receptor GPS. Un mapa de la ubicación de las estacas y del punto de partida del dron se presenta en la Figura 18.

Para la definición de los recorridos a ser realizados con el dron, se consideraron las configuraciones más adecuadas estudiadas previamente, las proyecciones de rendimientos obtenidas y la autonomía de las baterías. Respecto a estas últimas, debido a su deterioro ocasionado por el uso, estas solo disponían de 50 % de carga utilizable. Con 50% batería, el dron es capaz de tomar como máximo 107 fotos a 30 m de altura bajo la modalidad de mapping 3D. Para mapear el área total cubierta por las estacas ( $6000 \text{ m}^2$ ) suponiendo que el dron vuele a la altura mencionada, se requerirían 120 fotos. En cambio para 36 metros de altura, se requieren 105 fotos. Por esta razón se seleccionó esta altura para definir los recorridos bajo esta modalidad.

En esta instancia se efectuaron 4 vuelos a una velocidad de  $6 \text{ m/s}$ , dos por cada una de las metodologías aplicadas. A su vez, para cada metodología, se efectuó un vuelo por cada tipo de cámara (RGB y NGB) utilizada. Las alturas definidas para los recorridos fueron de 5 y 36 m correspondientes a las metodologías de procesamiento de imágenes y mapping 3D, respectivamente. Los datos estadísticos obtenidos por el sistema para cada vuelo se presentan en la Tabla 14. Para las misiones del tipo mapping 3D, se utilizó el carácter '-' para los campos Vest y ScoP indicando que estos valores no corresponden a esta modalidad.





Figura 18: Mapa de la distribución de las estacas en el potrero.

| IDR   | Tipo    | Cam | Alt (m) | NumF | Vest | ScoP | Tmed (s) | Dist (m) | Bat (%) |
|-------|---------|-----|---------|------|------|------|----------|----------|---------|
| 5630  | Estacas | RGB | 5       | 93   | 69   | 0,32 | 442      | 576      | 40      |
| 5630  | Estacas | NGB | 5       | 93   | 82   | 0,33 | 468      | 579      | 43      |
| 36368 | Mapping | RGB | 36      | 106  | -    | -    | 567      | 868      | 51      |
| 36368 | Mapping | NGB | 36      | 106  | -    | -    | 553      | 871      | 50      |

Tabla 14: Vuelos realizados para validar resultados de las distintas metodologías.

Referencias:

- Cam: tipo de cámara utilizado en la misión.

A partir de los valores presentados en la Tabla 14 se deduce que ambas técnicas emplearon niveles similares de batería entorno al 50%. Esto indica que la técnica de mapping 3D logra cubrir un área mas amplia que la cubierta por la otra técnica usando porcentajes similares de batería. Sin embargo, la técnica de procesamiento de imágenes empleó 20% menos del tiempo que fue necesario para completar los vuelos con la otra técnica.

Luego de efectuados los vuelos, aplicando la técnica de doble muestreo [84], se midió la altura y se cortó muestras de las pasturas que rodeaban a cada estaca. Estas fueron secadas durante 48 horas, luego de lo cual fueron pesadas para determinar la cantidad de Kg MS por hectárea disponible. Cabe aclarar que luego de este proceso, los resultados fueron organizados por punto de la escala visual, por lo

que no existe documentación de los resultados específicos obtenidos por doble muestreo para cada estaca.

En paralelo, se procesaron las imágenes obtenidas para los 4 vuelos. Cada foto correspondiente al recorrido 5630, fue procesada más de una vez utilizando distintos valores de *threshold*, definidos en función de las tonalidades de colores presentes en la misma, para permitir la correcta detección de cada estaca. Si bien, cada estaca puede apreciarse en al menos una foto a color y una infrarroja del total de obtenidas, el algoritmo empleado no logró en todos los casos determinar de forma correcta la cantidad de marcas azules visibles.

Con la ayuda de las herramientas ArgiSoft PhotoScan y Qgis, a partir de la secuencia de fotos obtenidas para las misiones del recorrido 36368, se generaron dos modelos de altura de las pasturas (CHM), uno por cada tipo de cámara empleado. Estos fueron postprocesados para delimitarlos de acuerdo al área específica de interés a ser estudiada. De esta forma, los modelos fueron coincidentes en dimensiones y georeferenciación y se evitaron valores incoherentes en las alturas, los cuales pueden aparecer en las proximidades a sus contornos. Esto aportó mayor precisión al momento de comparar resultados. Las alturas variaron dentro de un rango aceptable, comprendido entre -6 cm y 90 cm, y -15 cm y 123 cm para los modelos a color e infrarrojo, respectivamente. Con la ayuda de estas herramientas, y utilizando como referencias las coordenadas de las estacas fue posible extraer de los CHM las alturas promedio del pasto entorno a cada estaca.

En la Figura 19 se puede apreciar un extracto de un modelo 3D generado a partir de las fotografías RGB utilizando la herramienta ArgiSoft PhotoScan.

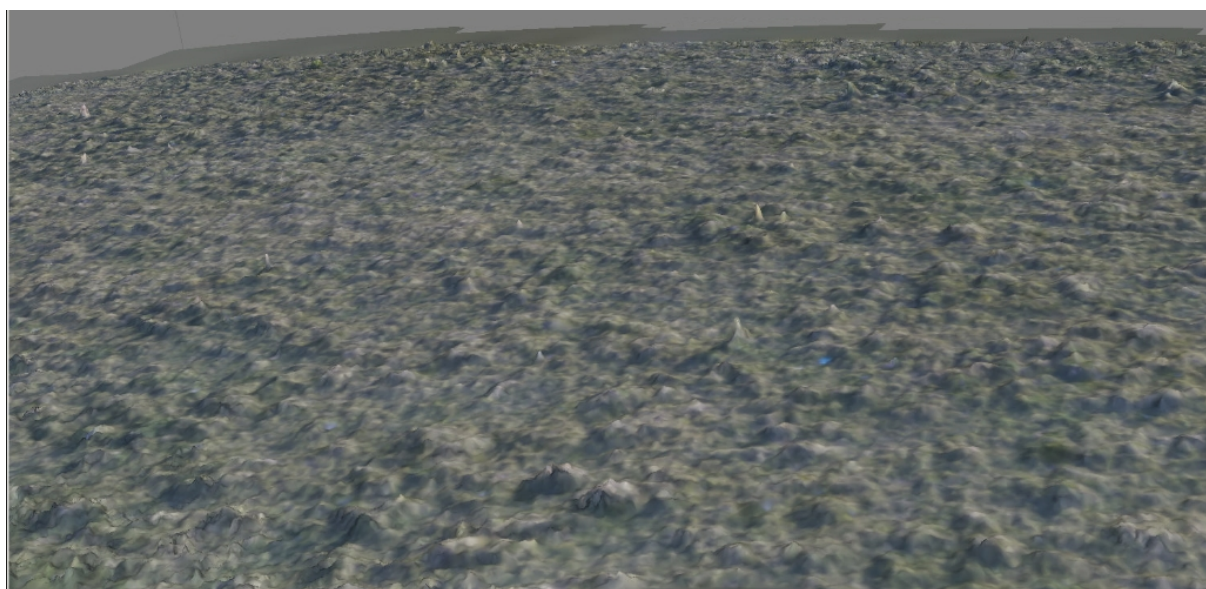


Figura 19: Extracto de malla 3D generado con fotografías a color.

En la Tabla 15 se presentan los resultados para las alturas de la pasturas, generados tanto por metodologías agronómicas como tecnológicas, agrupados por punto de la escala visual. Estos corresponden exclusivamente a aquellas pasturas que rodean a

cada estaca y se localizan a una distancia no superior a los 25cm de estas. Cabe aclarar, que a partir de los modelos no se obtuvieron buenos resultados considerando una superficie de 50cm de radio entorno a cada estaca. De esta forma se buscó abarcar la misma superficie considerada por el método de corte. Por otra parte, la última fila de esta tabla presenta los promedios de las alturas calculados a partir de la técnica mapping 3D para toda el área cubierta por las estacas.

En la Tabla 16 se presentan los resultados de Kg MS/ha generados por las distintas metodologías aplicadas, agrupados por punto de la escala visual. Para el caso de las metodologías tecnológicas, la cantidad promedio de Kg MS/ha fue calculada a partir de los datos de altura promedio del forraje determinados por estas técnicas y a partir de una regla genérica y válida para estimar disponibilidad de forraje en campos naturales, la cual indica que 1cm de altura del forraje corresponde con 300 Kg Ms/ha [91,92]. En ambas tablas, se utilizó el carácter '-' para indicar que determinada metodología no aportó la información correspondiente para el valor en cuestión.

| PEV                  | Doble Muestreo |            |              |              | Procesamiento Imágenes |                  | Mapping 3D       |                  |
|----------------------|----------------|------------|--------------|--------------|------------------------|------------------|------------------|------------------|
|                      | AltPE (cm)     | AltPP (cm) | AltPMin (cm) | AltPMax (cm) | AltPP (cm) (RGB)       | AltPP (cm) (NGB) | AltPP (cm) (RGB) | AltPP (cm) (NGB) |
| 1                    | 3              | 4,1        | 3            | 5,5          | 10,0                   | 23,3             | 3,8              | 2,9              |
| 2                    | 5              | 6,4        | 4,5          | 9,5          | 13,3                   | 4,4              | 5,3              | 5,5              |
| 3                    | 6,5            | 10,7       | 7            | 14,5         | 11,1                   | 27,8             | 8,5              | 7,4              |
| 4                    | 10,2           | 14,0       | 10           | 18           | 25,0                   | 25,0             | 6,0              | 0,8              |
| 5                    | 13,5           | 14,8       | 10           | 25           | 28,3                   | 23,3             | 14,0             | 12,3             |
| <b>Total estacas</b> | -              | 6,9        | -            | -            | 20,3                   | 29,3             | 7,9              | 7,9              |
| <b>Total área</b>    | -              | -          | -            | -            | -                      | -                | 4,2              | 6,9              |

Tabla 15: Comparación de resultados obtenidos para las alturas de las pasturas.

Referencias:

- PEV: punto de la escala visual.
- AltPP: altura promedio del pasto en cm.
- AltPE: altura de pasto en cm estimada determinada por agrónomos.
- AltPMax: altura máxima del pasto en cm.
- AltPMin: altura mínima del pasto en cm.

| PEV | Doble Muestreo   |                    |                    | Procesamiento Imágenes |                        | Mapping 3D             |                        |
|-----|------------------|--------------------|--------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
|     | BioP (Kg MS /ha) | BioMin (Kg MS /ha) | BioMax (Kg MS /ha) | BioP (Kg MS /ha) (RGB) | BioP (Kg MS /ha) (NGB) | BioP (Kg MS /ha) (RGB) | BioP (Kg MS /ha) (NGB) |
| 1   | 1357             | 1050               | 2056               | 3000                   | 7000                   | 1142                   | 866                    |
| 2   | 1690             | 1256               | 2027               | 4000                   | 1333                   | 1588                   | 1654                   |
| 3   | 2054             | 1283               | 2833               | 3333                   | 8333                   | 2563                   | 2207                   |
| 4   | 2783             | 2533               | 3033               | 7500                   | 7500                   | 1811                   | 232                    |
| 5   | 4062             | 3022               | 6050               | 8500                   | 7000                   | 4191                   | 3678                   |

Tabla 16: Comparación de resultados obtenidos para la biomasa de las pasturas.

Referencias:

- BioP: cantidad promedio de materia seca medida en Kg MS/ha
- BioMin: cantidad mínima de materia seca medida en Kg MS/ha
- BioMax: cantidad máxima de materia seca medida en Kg MS/ha

Independientemente del tipo de cámara utilizado, en los resultados presentados se puede apreciar que existe una gran diferencia entre los valores retornados por la aplicación de las distintas metodologías empleadas. La metodología de mapping 3D arroja resultados en un rango razonable, mientras que la otra no. Claramente se puede observar que la aplicación de mapping 3D con la cámara infrarroja fue el mecanismo que mejor se aproximó a las mediciones reales de disponibilidad.

Para el punto 4 de la escala visual se registraron los peores resultados para las metodologías tecnológicas. Por un lado, hay que tener en cuenta que para este valor de la escala solo se tomaron dos muestras vinculadas a 2 estacas, lo cual puede explicar en parte este fenómeno. Para cualquier punto de la escala, cuanto mayor sea la cantidad de muestras y de imágenes que se analicen o procesen, mejores resultados serán obtenidos en comparación con puntos de los que se cuenta con poca información. Por otro lado, la época del año seleccionada para realizar los experimentos (verano), así como las malas condiciones del potrero, el cual es un campo natural donde el pasto se encontraba totalmente comido, también tuvieron influencia en los resultados generados.

En parte los bajos resultados obtenidos por el procesamiento de imágenes radican en que la implementación actual de esta metodología no funciona bien para pasturas muy bajas ya que solo detecta variaciones de alturas del pasto en intervalos de 10 cm, valor que depende del diseño definido para las estacas. Esto contrasta con la realidad del área estudiada donde las pasturas tienen una baja altura que no supera los 15 cm en la mayoría de los casos. Hay que tener en cuenta que la graduación de estas reglas fue definida de esta manera para favorecer el procesamiento de imágenes. Debido a esto, las pasturas con alturas comprendidas en el rango en cm (0, 5), no son visibles por los algoritmos de procesamiento debido que no son lo suficientemente altas como para cubrir al menos una franja de la estaca. Por otro lado, cualquier punto donde el alto del forraje se encuentre en el intervalo en cm [5,10) será catalogado por el software con una altura de 10 cm. Lo mismo sucede para otros rangos de altura. De esto se deduce que los resultados presentados para esta técnica en la Tabla 15 tienen al menos 5 cm de error.

Por otro lado, para mejorar esta técnica se debería perfeccionar el módulo de procesamiento de imágenes para lograr la correcta detección de franjas de las estacas, las cuales en algunos casos no son detectadas en su totalidad (incluso luego de usar distintos *thresholds*). Cabe aclarar que este algoritmo realiza un procesamiento muy básico de las imágenes y que para su implementación, calibración y pruebas no se contó con demasiado tiempo. Esta razón explica las diferencias entre los valores obtenidos con esta técnica y los resultantes de aplicar la metodología de mapping 3D, ya que para esta última se utilizaron algoritmos mucho mas complejos, estudiados y perfeccionados. De todas maneras, al utilizar la cámara a color con la metodología de procesamiento de imágenes, los resultados mejoraron respecto a los obtenidos con el uso del otro tipo de cámara. Al menos los valores siguen una tendencia de aumento de acuerdo al incremento de las alturas promedio medidas por doble muestreo.

Para la metodología mapping 3D, sería bueno considerar una estrategia que permitiese la validación de resultados sobre toda o gran parte del área contigua mapeada. Con la estrategia que se utiliza actualmente y debido a errores de posicionamiento GPS, se puede estar corriendo el riesgo de comparar resultados obtenidos para una determinada ubicación del campo con otros generados para una una posición distinta de los modelos 3D. Por último, sería conveniente evaluar ambas metodologías sobre pasturas de mayor altura. En la Tabla 17 se presentan los resultados generados en términos de alturas de las pasturas para cada una de las estacas.

| IDE | Doble Muestreo |            | Procesamiento Imágenes |                  | Mapping 3D       |                  |
|-----|----------------|------------|------------------------|------------------|------------------|------------------|
|     | PEV            | AltPP (cm) | AltPP (cm) (RGB)       | AltPP (cm) (NGB) | AltPP (cm) (RGB) | AltPP (cm) (NGB) |
| 291 | 2              | 6,4        | 10                     | 40               | 4,6              | 3,5              |
| 292 | 3              | 10,7       | 10                     | 20               | 4,7              | 17,4             |
| 293 | 1              | 4,1        | 10                     | 10               | 3,3              | 4,2              |
| 294 | 2              | 6,4        | 40                     | 0                | 4,7              | 11,3             |
| 295 | 2              | 6,4        | 0                      | 50               | 5,8              | 3,5              |
| 296 | 1              | 4,1        | 10                     | 40               | 6,6              | 2,1              |
| 297 | 1              | 4,1        | 10                     | 0                | 1,5              | 2,4              |
| 298 | 5              | 14,8       | 50                     | 10               | 19,3             | 15,7             |
| 300 | 4              | 14,0       | 40                     | 40               | 5,9              | 1,3              |
| 302 | 3              | 10,7       | 10                     | 0                | 26,1             | 38,6             |
| 303 | 2              | 6,4        | 10                     | 40               | 3,9              | 10,7             |
| 304 | 3              | 10,7       | 10                     | 20               | 9,9              | 8,4              |
| 305 | 5              | 14,8       | 0                      | 20               | 16,3             | 3,1              |
| 306 | 3              | 10,7       | 0                      | 40               | 3,5              | 2,6              |
| 307 | 2              | 6,4        | 0                      | 50               | 3,4              | 7,7              |
| 308 | 2              | 6,4        | 40                     | 50               | 8,6              | 9,7              |
| 309 | 3              | 10,7       | 20                     | 50               | 8,4              | 0,7              |
| 310 | 3              | 10,7       | 50                     | 50               | 7,8              | 1,5              |
| 311 | 2              | 6,4        | 0                      | 50               | 13,3             | 2,9              |
| 312 | 3              | 10,7       | 0                      | 0                | 6,0              | 1,3              |
| 313 | 5              | 14,8       | 50                     | 50               | 3,1              | 11,1             |
| 314 | 4              | 14,0       | 20                     | 0                | 6,2              | 0,3              |
| 315 | 3              | 10,7       | 40                     | 50               | 7,8              | 0,4              |
| 316 | 3              | 10,7       | 20                     | 20               | 5,5              | 1,3              |
| 317 | 2              | 6,4        | 20                     | 20               | 3,4              | 0,5              |
| 318 | 5              | 14,8       | 50                     | 0                | 9,4              | 7,6              |
| 319 | 5              | 14,8       | 20                     | 50               | 20,2             | 20,8             |
| 320 | 2              | 6,4        | 0                      | 50               | 1,1              | 13,8             |
| 321 | 5              | 14,8       | 50                     | 30               | 15,6             | 15,3             |

Tabla 17: Resultados obtenidos por estaca.

Referencias:

- IDE: identificador de estaca.

## 6 Conclusiones y trabajo a futuro

---

En este trabajo los requerimientos funcionales y no funcionales fueron cumplidos, satisfaciéndose la definición de recorridos a realizar, los vuelos controlados con el dron, incluyendo la captura de imágenes georeferenciadas y el procesamiento de datos. A su vez, la aplicación desarrollada podrá ser fácilmente extendida en el futuro.

El potrero seleccionado para los experimentos representó un escenario muy complejo para estimar disponibilidad, dada la baja altura del forraje. Esto dificultó la observación y la comparación de diferencias entre los resultados obtenidos por distintas técnicas, las cuales podrían haber sido mas notorias para otros escenarios.

De acuerdo a la validación de resultados mediante técnicas agronómicas, se concluye que mapping 3D fue la metodología que permitió generar estimaciones más aproximadas para las alturas del forraje presente en el potrero. Específicamente, los mejores resultados para esta técnica se obtuvieron con la cámara a color (RGB).

En cambio, para el escenario seleccionado, se concluye que la técnica de procesamiento de imágenes desarrollada hasta el momento no genera buenos resultados. Esto se debe por un lado, a que se implementó utilizando técnicas básicas y a que no se contó con demasiado tiempo de programación, ajuste, calibración y pruebas para su desarrollo. A su vez, esto también se atribuye a que el diseño de las estacas fue pensado para potreros de mayor variabilidad en las alturas del forraje. Por esta razón y para facilitar el procesamiento de imágenes se construyeron como reglas graduadas de pocas divisiones. Pero esto condicionó el desempeño de los algoritmos de procesamiento utilizados con esta técnica para estimar disponibilidad, los cuales además requieren de ajustes para lograr una mejor detección de las marcas de las estacas cubiertas por las pasturas. De todas formas, los expertos en el tema, valiéndose de estas referencias, pueden deducir la cantidad de pasto disponible de forma mas certera a partir de la observación de las imágenes obtenidas.

Si bien la metodología de procesamiento de imágenes es menos costosa que otras técnicas tradicionales comúnmente utilizadas para estimación de disponibilidad, es más costosa de implementar que la de mapping 3D. Particularmente, la colocación y el mantenimiento de las estacas requiere trabajo. Se pudo comprobar que las inclemencias del tiempo como tormentas y vientos fuertes, así como la presencia de animales en los potreros provocan que estas sean retiradas de su ubicación original. Estas circunstancias, originan tareas extra de re ubicación de estos dispositivos, ya que para lograr efectividad en la aplicación de esta metodología, es fundamental que todas las estacas estén correctamente ubicadas en su posición correspondiente. Esto a su vez puede acarrear la perdida de color o el deterioro de las estacas, por lo tanto es necesario disponer de otras de reemplazo. En caso de que se requiriera el estudio de otro potrero u de otra área del mismo, las mismas deben ser trasladadas y re colocadas en su nueva ubicación. Además, hay que tener en cuenta que se requieren varias estacas para lograr estudiar correctamente la variabilidad de las pasturas de un potrero.

Los resultados generados por esta metodología son muy dependientes del sistema GPS. Errores de precisión de los receptores GPS, ocurridos durante los vuelos del dron o en el momento de suministro de las coordenadas a la aplicación, pueden afectar la correcta captura de las imágenes y por ende la generación de resultados. Durante los experimentos, estos errores se produjeron a pesar de los esfuerzos destinados durante la implementación para controlarlos. Esto también implicó la realización de ajustes desde la aplicación y en el potrero de las ubicaciones de las estacas. Cabe aclarar que lo que mejor resuelve esta problemática, es suministrar los datos de las ubicaciones como posiciones relativas en metros medidas a partir del punto de partida de la aeronave. Sin embargo, la definición de estas posiciones implica realizar mediciones con cinta y brújula, lo cual lleva mucho trabajo dada la extensión de los potreros. De todas maneras, en el marco de este proyecto exploratorio, esta metodología permitió tener un primer acercamiento al problema y profundizar el conocimiento sobre el dron.

Por otra parte, la técnica de mapping 3D tiene menor dependencia del sistema GPS que la anterior metodología. Un error de 2 o 3 metros respecto de la posición en la cual se deberían haber tomado las fotos, no tiene influencia en su correcta aplicación. Para esto es suficiente con que todas las fotos tengan un alto grado de solapamiento igual o superior al 70% entre ellas que permita la generación de modelos. Sin embargo, requiere una importante precisión del receptor GPS que se utilice para la especificación de la posición espacial y altura del terreno correspondientes a cada uno de los puntos de apoyo a ser utilizados en la construcción de los modelos.

La técnica de mapping 3D tiene la desventaja de requerir un mayor número de fotos, y un consumo de batería levemente mayor de los necesarios para aplicar la metodología de procesamiento de imágenes, sin embargo, fue implementada con algoritmos más complejos y depurados y permite cubrir mayor extensión territorial que esta y brindar una visión unificada sobre toda el área de estudio. Para mapear de forma eficiente un área de 6000m<sup>2</sup> como la utilizada en los experimentos, es necesario que el dron vuele a alturas entorno a los 30 y 40 metros. De esta forma, la cantidad de fotos obtenidas es menor que la requerida para vuelos desde alturas inferiores. Si bien a mediada que el dron vuela más alto, la precisión en cm/pixel de las fotografías se reduce, se pudieron obtener buenos resultados para una altura de 36 m y utilizando una cámara de tan solo 8 MP.

Cabe resaltar que los resultados generados en este trabajo se obtuvieron utilizando un equipamiento tecnológico que no es el mejor que se puede conseguir en el mercado. En particular, con la técnica de mapping 3D se podrían haber generado resultados aún mejores si se hubiera contado con un dron y una cámara de mayor tecnología. Por otro lado, la decisión de colocar la cámara directamente apuntando hacia el suelo no fue del todo acertada. Si bien se consideró a esta estrategia como lo mas adecuada para la aplicación de la técnica de mapping 3D, algunos inconvenientes surgieron en la práctica que no pudieron ser detectados previamente. El dron para trasladarse se inclina de acuerdo a la dirección en la cual va a moverse, con lo cual el módulo de control aéreo (que está fijo) también lo hace y por ende la cámara. Este hecho afecta la captura de fotos mientras el dron esté movimiento o para recorridos que empleen un umbral igual o mayor que 1m, debido a puede



suceder que las fotografías sean tomada en momentos en que la cámara no esté enfocando al suelo.

La elección de tecnologías utilizadas en este trabajo fue acertada porque permitió el cumplimiento de las exigencias pautadas en los requerimientos. Se concluye que para el desarrollo de un trabajo de investigación, una buena estrategia es recurrir al uso de herramientas de software libre, que estén bien documentadas y estén apoyadas por una amplia comunidad detrás. La amplia variedad de librerías disponibles para Python, lo convierten en un lenguaje ideal para este tipo de trabajos.

Como trabajo futuro, se pretende perfeccionar la aplicación de esta metodologías, abordando problemáticas independientes que pudieron haber sido mejor resueltas de otra manera. En primer lugar, se debería considerar la utilización de un estabilizador para mantener la cámara en la posición deseada en todo momento, independientemente de los movimientos del dron. Esto permitiría además la obtención de fotografías desde distintos ángulos, las cuales podrían ofrecer mayor información acerca de las altura de las pasturas que rodean a cada estaca.

Para precisar el posicionamiento del dron sobre el potrero, existen al menos dos caminos posibles. Una de ellos implica estudiar y evaluar otras formas de guiar el dron que no sean totalmente dependientes del sistema GPS. Por ejemplo, para el dron empleado en este proyecto existe una estrategia de movimientos basada en vectores de velocidad, que consiste en indicarle a la aeronave a que velocidad moverse y por cuanto tiempo [58]. Otra de las alternativas sería utilizar instrumentos más precisos para la obtención de posiciones GPS que tengan un error despreciable, como los utilizados por militares o para trabajos topográficos.

Por otro lado, se debería trabajar en la mejora de los algoritmos de procesamiento de imágenes y en los tratamientos de los de modelos de las pasturas. Sobre los CHM generados durante este trabajo, no se aplicó ningún tipo de filtro o clasificación de puntos con el fin de descartar aquellos pixeles de información no deseados o para distinguir distintas especies de forraje. Claramente en los modelos generados se pudo notar la presencia de materia fecal del ganado producto del ingreso de animales al potrero seleccionado para los experimentos. Esto puede haber influido de alguna manera en las estimaciones de altura promedio del forraje obtenidas. Por lo tanto, como trabajo futuro sería bueno explorar herramientas de modelado que permitan el perfeccionamiento de los modelos generados, eliminando entre otras cosas malesas, materia de animales, etc y la segmentación de resultados de disponibilidad por tipo de especie considerada.

De acuerdo a los conocimientos y experiencias adquiridas a lo largo de este proyecto, uno de los siguientes pasos sería aplicar los modelos, metodologías y software desarrollados sobre otro modelo de dron más adecuado. Con esto se pretende buscar un nuevo modelo que no requiera la modificación de su diseño aerodinámico para el cumplimiento de los requerimientos planteados en este proyecto y que posibilite la utilización y fácil migración de las herramientas desarrolladas. La fácil incorporación y control de cámaras, así como una mayor autonomía de la batería son aspectos deseables que debería cumplir la aeronave a ser seleccionada.



De acuerdo al avance actual de la tecnología y dadas las características de equipamiento de software y hardware utilizado en este proyecto, se considera que el candidato mas adecuado es Erle-Copter [85] de la empresa española Erle Robotics [85]. Sus características son muy interesantes. Incluye una mini-computadora Raspberry PI 2 y una Raspberry PI Camera. Además brinda soporte para ArduCopter y para varios frameworks y servicios de desarrollo de aplicaciones robóticas, incluyendo a DroneKit-Python. Por lo tanto, todo el conocimiento y desarrollo generado en este proyecto puede ser perfectamente aplicado en esta arquitectura.

Otro camino a explorar es la incorporación de nuevos sensores al UAV que posibiliten el desarrollo de nuevas metodologías de estimación de disponibilidad. Los resultados generados por estas deberían ser comparados por las metodologías desarrolladas hasta el momento para determinar su eficiencia. Específicamente, se tiene especial interés en trabajar con sensores del tipo LIDAR los cuales han sido utilizados para generación de modelos de superficie y elevación del terreno [75].

Desde el punto de vista agronómico, queda pendiente la evaluación de metodologías frente a distintos escenarios (tipos de pasturas, épocas del año, etc.). Particularmente, se cree conveniente experimentar sobre pasturas sembradas porque al presentar mayor altura que las de campo natural, permitirían la obtención de valores mas elevados de disponibilidad que los registrados hasta el momento. Además, interesa sacarle mayor provecho a las fotos infrarrojas obtenidas. A partir de estas se pretende calcular índices como el NDVI, para medir otro tipo de magnitudes presentes en las pasturas, como nivel de humedad, clorofila y productividad del forraje. Por último, se pretende construir estacas mejor graduadas, para permitirle a los expertos en el tema realizar estimaciones visuales de disponibilidad de pasturas a partir de las fotografías obtenidas con el dron. Esta estrategia permitiría a los agrónomos ahorrar tiempo y obtener estimaciones mas certeras valiéndose de mejores referencias.

## 7 Referencias bibliográficas

---

- [1] G. Giudice. ¿Cómo se comportan los sistemas de producción uruguayos?. Reporte técnico, Instituto Nacional de la Leche, Uruguay, 2016. [En línea]. <https://www.portalechero.com/innovaportal/v/10161/1/innova.front/como-se-comportan-los-sistemas-de-produccion-uruguayos:-gabriel-giudice-inale.html> consultado en Diciembre de 2016.
- [2] H. Fernández. Estimación de la disponibilidad de pasto. Reporte técnico, Área de Producción Animal, Estación Experimental Agropecuaria Balcarce, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. 2004.
- [3] T. Lynham, B. Pierce. Monitoring vegetation greenness using satellite data. Sault Ste. Marie, Ont.: Great Lakes Forestry Centre, 1997, 20 p.
- [4] G. García, G. Irisarri, R. Golluscio. Uso de un sistema de seguimiento forrajero basado en imágenes satelitales para estimar variaciones entre años de la producción del pastizal. Reporte técnico, Facultad de Agronomía, Universidad Nacional de Buenos Aires, 2010.
- [5] RCTecnic. ¿Qué es un Drone y como funciona?. [En línea]. [http://www.rctecnic.com/blog/10\\_Que-es-un-Drone-y-como-funciona](http://www.rctecnic.com/blog/10_Que-es-un-Drone-y-como-funciona) consultado en Mayo de 2016.
- [6] ArduPilot ORG. 3D Mapping. ArduCopter documentation. [En línea]. <http://ardupilot.org/copter/docs/introduction.html#introduction> consultado en Junio de 2016.
- [7] Cámara de Industrias del Uruguay. El Sector de Productos Lácteos. Reporte técnico, Dirección de Estudios Económicos de CIU, Octubre 2000. [En línea]. <http://www.ciu.com.uy/informe/lacteo.doc> consultado en Abril de 2016.
- [8] J. Grigera. Estimación del crecimiento de forraje. Implicancias practicas en sistemas de producción lechera. Facultad de Agronomía, Universidad Nacional de Buenos Aires. [En línea]. <http://www.agro.uba.ar/sites/default/files/catedras/jgrigera.pdf> consultado en Mayo de 2016.
- [9] A. Pías. Sección 2, Mediciones del forraje en sistemas lecheros. Documento del Estado del Arte.
- [10] A. Pías. Sección 3, Vehículos Aéreos no Tripulados. Documento del Estado del Arte.
- [11] F. Montossi, M. Pravia, A. Dighiero, V. Porcile, D. Gutiérrez, I. De Barbieri. Estimaciones indirectas de la cantidad de forraje para una mejor gestión de nuestras pasturas. Revista INIA, no. 34, 2013, p. 26-29. [En línea]. <http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/2204/1/18429031013133745.pdf> consultada en Agosto de 2016
- [12] Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca - Facultad de Agronomía de la Universidad de la República. Clase 2.1, Seguimiento forrajero vía teledetección, Módulo 2, Ecología del campo natural, del curso de Producción animal sostenible en pastoreo sobre campo natural. [En línea]. <https://www.youtube.com/watch?v=hGVZawnYA1A> consultado en Diciembre de 2016
- [13] A. Montessoro. Cómo Referenciar Geográficamente tus Fotos. dzoom. [En línea]. <http://www.dzoom.org.es/como-referenciar-geograficamente-tus-fotos/> consultado en Noviembre de 2017.

- [14] E. Vélez de Villa. Factores de origen ambiental que afectan la producción de leche en vacunos bajo pastoreo semi-intensivo. Reporte técnico, Sistema de Revisiones en Investigación Veterinaria de San Marcos, Facultad de Medicina Veterinaria, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Perú, 2013.
- [15] M. Remuñán. Manual del operador de RPAS, Asociación Uruguaya de Drones, Dirección Nacional de Aviación Civil e Infraestructura Aeronáutica - Uruguay, 2016.
- [16] O. López. Disponibilidad de Forrajes y Carga Animal. Reporte técnico, Universidad Popular de Nicaragua, Nicaragua, 2015. [En línea]. <http://es.slideshare.net/otoniellalopez/disponibilidad-forrajes-y-carga-animal> consultado en Setiembre de 2016.
- [17] N. Mónaco, V. Rosa, V. Santa, A. Heguiabehere. Utilización de estimadores para determinación de biomasa a campo. Departamento de Ecología Agraria, Facultad de Agronomía y Veterinaria, Universidad Nacional de Río Cuarto, Argentina, 2015.
- [18] A. Pías. Sección 2, Mediciones del forraje en sistemas lecheros. Documento del Estado del Arte.
- [19] Public Lab. NDVI from Infrablue. [En línea]. <https://publiclab.org/notes/cfastie/06-20-2013/ndvi-from-infrablue> consultado en Mayo de 2016.
- [20] A. Pías. Sección 2.4.3, Metodología mediante imágenes satelitales. Documento del Estado del Arte.
- [21] Conaprole - UdelaR - UBA. Incorporación de las TICs en el proceso de gestión, monitoreo y control de sistemas pastoriles de producción de leche. Reporte técnico para postulación en programa del Fondo Sectorial INNOVAGRO, ANII, PE\_FSA\_2009\_1\_1614, 2009.
- [22] G. Piñeiro, M. Oesterheld, J. Paruelo. Seasonal Variation in Aboveground Production and Radiation-use Efficiency of Temperate rangelands Estimated through Remote Sensing. Facultad de Agronomía, Departamento de Recursos Naturales y Ambiente, Laboratorio de Análisis Regional y Teledetección (LART), Universidad de Buenos Aires, IFEVA/CONICET, Argentina.
- [23] G. Grigera. Seguimiento de la productividad forrajera mediante teledetección: desarrollo de una herramienta de manejo para sistemas de producción ganaderos. Tesis de Doctorado, Escuela para Graduados Alberto Soriano, Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires, 2011.
- [24] D. Anthony, S. Elbaum, A. Lorenz. C. Detweiler. On crop height estimation with UAVs. Department of Computer Science and Engineering, Universidad de Nebraska. [En línea]. [https://www.researchgate.net/publication/287906358\\_On\\_crop\\_height\\_estimation\\_with\\_UAVs](https://www.researchgate.net/publication/287906358_On_crop_height_estimation_with_UAVs) consultado en Julio de 2016.
- [25] S. von Bueren. Deploying four optical UAV-based sensors over grassland: challenges and limitations. Institute of Agriculture & Environment, Massey University, Palmerston North, Nueva Zelanda. 2015.
- [26] Anez Consulting. Using a Drone's Surface Model to Estimate Crop Yields & Assess Plant Health. Blog WayPoint. [En línea]. <http://waypoint.sensefly.com/drone-surface-model-estimate-crop-yield-plant-health/> consultado en Mayo de 2016.

- [27] LDP LLC. Remote Sensing Cameras. [En línea]. <http://www.maxmax.com/maincamerapage/remote-sensing> consultado en Mayo de 2016.
- [28] 3D Robotics. About 3DR. [En línea]. <https://3dr.com/about/> consultado en Mayo de 2016.
- [29] 3D Robotics. Iris+. 3DR Support. [En línea]. <https://3dr.com/support/sections/200257165/iris/> consultado en Mayo de 2016.
- [30] A. Pías. Sección 4, 3DR Iris+. Documento del Estado del Arte.
- [31] GoPro. About us. [En línea]. <https://es.gopro.com/about-us> consultado en Mayo de 2016.
- [32] I. Butler. Drones above the Vineyards. Blog theUAVguy. [En línea]. <https://theuavguy.wordpress.com/tag/ngb/> consultado en Octubre de 2016.
- [33] ArcTron 3D GmbH. Airborne Laser Scanning. [En línea]. [http://www.arctron.de/en/services/surveying/airborne\\_laser\\_scanning/](http://www.arctron.de/en/services/surveying/airborne_laser_scanning/) consultado en Mayo de 2016.
- [34] Drone Spain. Cámaras multiespectrales en drones. [En línea] <http://dronespain.pro/camaras-multiespectrales-en-drones/> consultado en Mayo de 2016.
- [35] R. Boesch, Y. Bühler, C. Ginzler, M. Adams, R. Fromm. A. Graf. Optimizing channel weights for digital surface models with snow coverage. Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research WSL, Birmensdorf, Suiza, 2016.
- [36] L. Meier. Pixhawk Flight Controller Hardware Project. [En línea]. <https://pixhawk.org/start> consultado en Mayo de 2016.
- [37] A. Pías. Sección 4.2, Pixhawk. Documento del Estado del Arte.
- [38] ArduPilot ORG. CHDK Camera Control Tutorial. Copter documentation. [En línea]. <http://ardupilot.org/copter/docs/common-chdk-camera-control-tutorial.html#common-chdk-camera-control-tutorial> consultado en Mayo de 2016.
- [39] Raspberry PI Foundation. Camera Module - Raspberry PI. [En línea]. <https://www.raspberrypi.org/products/camera-module-v2/> consultado en Mayo de 2016.
- [40] Public Lab. Near-Infrared Camera. [En línea]. <https://publiclab.org/wiki/near-infrared-camera> consultado en Julio de 2016.
- [41] Raspberry PI Foundation. Help Guides and Resources - How to Use Raspberry PI. [En línea]. <https://www.raspberrypi.org/help/> consultado en Mayo de 2016.
- [42] L. Meier, A. Tridgell, P. Grobler. MAVLink Micro Air Vehicle Communication Protocol. QgroundControl. [En línea]. <http://qgroundcontrol.org/mavlink/start> consultado en Mayo de 2016.
- [43] D. Bovet, M. Cesati. Understanding the Linux Kernel: From I/O Ports to Process Management. Sebastopol: O'Reilly Media, Inc, 2005, 944p.
- [44] Horizon Hobby. Understanding Telemetry. [En línea]. <http://www.spektrumrc.com/Articles/Article.aspx?ArticleID=1536> consultado en Mayo de 2016.
- [45] ArduPilot ORG. Communicating with Raspberry PI via MAVLink. ArduPilot Development Site. [En línea]. <http://ardupilot.org/dev/docs/raspberry-pi-via-mavlink.html> consultado en Mayo de 2016.

- [46] ArduPilot ORG. Making a Mavlink WiFi bridge using the Raspberry PI. ArduPilot Development Site. [En línea]. <http://ardupilot.org/dev/docs/making-a-mavlink-wifi-bridge-using-the-raspberry-pi.html> consultado en Mayo de 2016.
- [47] Mckiwen. Tecnología del transporte: materiales ligeros (I), los materiales metálicos. Blog Motorpasionfuturo (WeblogsSL). [En línea]. <https://www.motorpasionfuturo.com/mecanica-eficiente/tecnologia-del-transporte-materiales-ligeros-i-los-materiales-metalicos> consultado en Mayo de 2016.
- [48] U. Méndez. ¿Qué son los Jumpers?. [En línea]. <https://www.330ohms.com/blogs/blog/85215044-que-son-los-jumpers> consultado en Mayo de 2016.
- [49] B. Traynor. Technical Parameters (v.2 board). Rpi Camera Module. Embedded Linux Wiki. [En línea]. [http://elinux.org/Rpi\\_Camera\\_Module#Technical\\_Parameters\\_.28v.2\\_board.2\\_9](http://elinux.org/Rpi_Camera_Module#Technical_Parameters_.28v.2_board.2_9) consultado en Mayo de 2016.
- [50] ArduPilot ORG. Introducing Copter. ArduCopter documentation. [En línea]. <http://ardupilot.org/copter/docs/introduction.html#introduction> consultado en Junio de 2016.
- [51] ArduPilot ORG. Mission Planner Home. Mission Planner documentation. [En línea]. <http://ardupilot.org/planner/index.html> consultado en Mayo de 2016.
- [52] ArduPilot ORG. APM Planner 2 Home. APM Planner 2 documentation. [En línea]. <http://ardupilot.org/planner2/index.html> consultado en Mayo de 2016.
- [53] 3D Robotics. DroneKit. [En línea]. <http://dronekit.io/> consultado en Mayo de 2016.
- [54] T. Ryan. Example HTML5-based GCS for UAVs built on DroneKit Python (Tower for Web). [En línea]. <https://github.com/dronekit/tower-web> consultado en Junio de 2016.
- [55] M. Summerfield, T. Samaniego. Python 3. Madrid: Anaya Multimedia, 2010, 512 p.
- [56] Flask community. Flask Documentation (0.12). [En línea]. <http://flask.pocoo.org/docs/0.12/> consultado en Junio de 2016.
- [57] JetBrains. Getting Started with Pycharm. [En línea]. <https://www.jetbrains.com/pycharm/> consultado en Junio de 2016.
- [58] 3D Robotics. Example: Guided Mode Movement and Commands (Copter). Dronekit-Python. [En línea]. <http://python.dronekit.io/examples/guided-set-speed-yaw-demo.html> consultado en Junio de 2016.
- [59] A. Pías. Secciones 4.5 y 4.6. Documento del Estado del Arte.
- [60] 3D Robotics. Position control. Guiding and Controlling Copter. Dronekit-Python. [En línea]. [http://python.dronekit.io/guide/copter/guided\\_mode.html#guided-mode-copter-position-control](http://python.dronekit.io/guide/copter/guided_mode.html#guided-mode-copter-position-control) consultado en Junio de 2016.
- [61] Movable Type Ltd. Calculate distance, bearing and more between Latitude/Longitude points. [En línea]. <http://www.movable-type.co.uk/scripts/latlong.html> consultado en Julio de 2016.
- [62] J. Guerrero. Distancia entre dos puntos de la superficie terrestre mediante la fórmula de Haversine con Python. [En línea]. <https://joseguerreroa.wordpress.com/2012/11/13/distancia-entre-dos-puntos-de-la-superficie-terrestre-mediante-la-formula-de-haversine-con-python/> consultado en Julio de 2016.

- [63] Mio technology. GPS accuracy and error sources. [En línea]. [https://eu.mio.com/es\\_es/global-positioning-system\\_4992.htm](https://eu.mio.com/es_es/global-positioning-system_4992.htm) consultado en Julio de 2016.
- [64] J. Russell, J. R. Cohn. Dijkstra's Algorithm. Book on Demand, 2012, 144 p.
- [65] G. Gutin, A. Punnen. The traveling salesman problem and its variations. New York: Springer, 2002, 830 p.
- [66] D. Applegate, R. Bixby, V. Chvatal, W. Cook. The Traveling Salesman Problem: A Computational Study. Princeton: Princeton University Press, 2011, 608 p.
- [67] T. Bäck. Evolutionary Algorithms in Theory and Practice: Evolution Strategies, Evolutionary Programming, Genetic Algorithms. New York [u.a.]: Oxford University Press, 1996, 314 p.
- [68] Applying a genetic algorithm to the travelling salesman problem. [En línea]. <https://gist.github.com/turbofart/3428880> consultado en Agosto de 2016.
- [69] J. Lee. Applying a genetic algorithm to the traveling salesman problem. The Project Spot. [En línea]. <http://www.theprojectspot.com/tutorial-post/applying-a-genetic-algorithm-to-the-travelling-salesman-problem/5> consultado en Agosto de 2016.
- [70] Pix4D. Introducción a Pix4Dmapper. Webinar 16, 2015. [En línea]. <https://www.youtube.com/watch?v=vUI1xmZbH20> consultado en Agosto de 2016.
- [71] Departamento de Ingeniería Biológica. Universidad de la República. Quiénes somos. [En línea]. <http://ingenieriabiologica.cup.edu.uy/> consultado en Agosto de 2016.
- [72] M. Hlaing. Evaluation of Digital Surface Model Data to Improve Forest Biomass Estimation from SPOT HRG. Department of Sociology and Anthropology, La Trobe University, Australia, 2010.
- [73] A. Cunliffea, R. Braziera, K. Andersonb. Ultra-fine grain landscape-scale quantification of dryland vegetation structure with drone-acquired structure-from-motion photogrammetry. Revista Remote Sensing of Environment, University of Exeter, Inglaterra, no. 183, 2016, p. 129-143.
- [74] Z. Li, Q. Zhu, C. Gold. Digital Terrain Modeling: Principles and Methodology. New York: CRC Press, 2004, 323 p.
- [75] B. St-Onge. N. Achaichia. MEASURING FOREST CANOPY HEIGHT USING A COMBINATION OF LIDAR AND AERIAL PHOTOGRAPHY DATA. Department of Geography, Université du Québec à Montréal, Canada, 2001.
- [76] OpenDroneMap. OpenDroneMap. [En línea]. <https://github.com/OpenDroneMap/OpenDroneMap> consultada en Noviembre de 2016.
- [77] OpenDroneMap. WebODM. [En línea]. <https://github.com/OpenDroneMap/WebODM> consultada en Diciembre de 2016.
- [78] Argisoft en España. Argisoft Photoscan. [En línea]. <https://www.agisoft.es/products/agisoft-photoscan/> consultada en Noviembre de 2016.
- [79] QGIS. Documentación de Qgis. [En línea]. <http://www.qgis.org/es/docs/index.html> consultada en Noviembre de 2017.
- [80] ArcGis. Características de ArcGis. [En línea]. <https://www.arcgis.com/features/features.html> consultada en Noviembre de 2016.

- [81] A. Eames. PiNoIR – what's it for? Comparison of RasPiCam and Pi NoIR output in daylight. RasPi.TV. [En línea] <http://raspi.tv/2013/pinoir-whats-it-for-comparison-of-raspicam-and-pi-noir-output-in-daylight> consultado en Junio de 2016.
- [82] ZCopters Aerial Imaging. Dónde colocar puntos de control. Aprende a realizar topografía con drones [En línea] <https://www.youtube.com/watch?v=5lQJxjUWwCA> consultado en Diciembre de 2016.
- [83] Google Earth. Información de Google Earth. [En línea]. [https://www.google.es/intl/es\\_es/earth/learn/](https://www.google.es/intl/es_es/earth/learn/) consultado en Enero de 2017.
- [84] K. Haydock, N. Shaw. The comparative yield method for estimating dry matter yield of pasture. *Revista Australian Journal of Experimental Agriculture*, vol 15, no. 76, 1975, pp. 663-670.
- [85] Erle Robotics. Erle-Copter. Erle Robotics Docs. [En línea]. [http://docs.erlerobotics.com/erle\\_robots/erle\\_copter](http://docs.erlerobotics.com/erle_robots/erle_copter) consultado en Febrero de 2017.
- [86] Raspberry PI Foundation. Picamera 1.2 documentation. [En línea]. <http://picamera.readthedocs.io/en/release-1.12/> consultado en Mayo de 2016.
- [87] M. Pujol. Gramíneas: Aplicaciones Agronómicas. Barcelona: Edicions UPC, 1998, 219 p.
- [88] Cámara de Industrias del Uruguay. El Sector de Productos Lácteos. Reporte técnico, Dirección de Estudios Económicos de CIU, Octubre 2000. [En línea]. <http://www.ciu.com.uy/informe/lacteo.doc> consultado en Abril de 2016.
- [89] Uruguay XXI. Agronegocios. Oportunidades de inversión en Uruguay. Reporte técnico, Instituto de promoción de inversiones y exportaciones de Uruguay, Diciembre 2016. [En línea]. [www.uruguayxxi.gub.uy/informacion/wp-content/uploads/sites/9/2017/01/Informe-Agronegocios-Diciembre-2016-Uruguay-XXI.pdf](http://www.uruguayxxi.gub.uy/informacion/wp-content/uploads/sites/9/2017/01/Informe-Agronegocios-Diciembre-2016-Uruguay-XXI.pdf) consultado en Abril de 2016.
- [90] 3D Robotics. 915 MHz (American) Telemetry Radio Set. [En línea]. <https://store.3dr.com/products/915-mhz-telemetry-radio> consultado en Junio de 2016.
- [91] M. Do Carmo, G. Cardozo, P. Soca. Measurement of Campos rangelands herbage mass by simple methods. *Proceedings of the 68th Annual Meeting of the Society for Range Management*, Sacramento, California, USA, 2015, 101 p.
- [92] INIA Treinta Tres. Día de Campo de la Unidad Experimental Palo a Pique. "Discutiendo los sistemas criadores mano a mano". 2016.
- [93] Hacklab Paysandú. Qué hacemos. [En línea]. [http://server.paap.cup.edu.uy/wordpress\\_hlab/index.php/la-propuesta/](http://server.paap.cup.edu.uy/wordpress_hlab/index.php/la-propuesta/) consultado en Enero de 2017.
- [94] The Gnome Project. Gedit. [En línea]. <https://wiki.gnome.org/Apps/Gedit> consultado en Enero de 2017.
- [95] 3D Robotics. Setting up a Simulated Vehicle (SITL). DroneKit-Python. [En línea]. [http://python.dronekit.io/develop/sitl\\_setup.html](http://python.dronekit.io/develop/sitl_setup.html) consultado en Junio de 2016.
- [96] F. Osorio. Introducción a la programación en Java. Medellín, Colombia: Instituto Tecnológico Metropolitano, 2007, 196 p.
- [97] G. Notte, M. Pedemonte, H. Cancela, P. Chilbroste. Resource allocation in pastoral dairy production systems: Evaluating exact and genetic algorithms approaches. *Revista Agricultural Systems*, vol. 148, p. 114-123.