



Escola Politècnica Superior
de Castelldefels

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

TRABAJO DE FINAL DE CARRERA

Título: Estación de seguimiento SKY-EYE para UAVs: mecanismos de georeferenciación y ortorectificación de imágenes aéreas

Titulación: Ingeniería Técnica de Telecomunicación, especialidad Sistemas de Telecomunicación, plan 2000.

Autor: Miriam González Rodríguez

Director: Marco A. Peña Basurto

Fecha: 16 de julio de 2007

Título: Estación de seguimiento SKY-EYE para UAVs: mecanismos de georeferenciación y ortorectificación de imágenes aéreas

Titulación: Ingeniería Técnica de Telecomunicación, especialidad Sistemas de Telecomunicación, plan 2000.

Autor: Miriam González Rodríguez

Director: Marco A. Peña Basurto

Fecha: 9 de julio de 2007

Resumen

Debido a los numerosos incendios que se ocasionan, se están realizando diversos estudios y desarrollos con el fin de tener de la manera más precisa un control de los mismos.

Disponer de una medida de control aérea, mediante la utilización de aviones no tripulados y con la posibilidad de recopilación de información fotográfica es el motor principal de la realización del proyecto.

Este proyecto surge en base al proyecto formado por la unión de ICARUS UPC y una serie de empresas, promotores del desarrollo de la idea, que proponen la visión de futuro.

SKY-EYE se encarga del desarrollo de una de las partes que constituyen la prevención de incendios forestales, propone el desarrollo de una aplicación que sirva como ejemplo de estación de seguimiento, capaz de controlar en todo momento la ubicación del avión, controlar el plan de vuelo y misión a realizar. De esta manera facilitaría en gran medida la realización del estudio para controlar el incendio y evitar su propagación.

El desarrollo de la aplicación participa en tres ámbitos diferenciados: modelización del plan de vuelo y misión, interfaz de usuario para el seguimiento y mecanismos de georeferenciación/ortonormalización de la información capturada. En este proyecto se describe el desarrollo de la georeferenciación y ortonormalización de información telemétrica y fotográfica para ser ubicada en la zona cartográfica sobre la que se ejecuta el plan de vuelo.

El documento aporta un estudio de las diversas herramientas de información geográfica para poder seleccionar la más acorde al proyecto SKY-EYE. Esta herramienta supondrá la base de la estación de seguimiento y a partir de ella se desarrollaran las diversas tareas de implementación.

El proyecto realizara un estudio de la metodología de georeferenciación de imágenes aéreas así como de su rectificación y describe el proceso de implementación y pruebas de su desarrollo.

Title: Estación de seguimiento SKY-EYE para UAVs: mecanismos de georeferenciación y ortorectificación de imágenes aéreas

Author: Míriam González Rodríguez

Director: Marco A. Peña Basurto

Date: July 9th 2007

Overview

Due to the numerous fires that are caused, diverse studies and development whit the purpose of having of the most precise way a control of such are being made.

To have a measurement of flight control, by means of the use of manned airplanes and with the possibility of compilation of photo intelligence is not the main motor of the accomplishment of the project.

This project arises on the basis of the project formed by the union from ICARUS UPC and a series from companies, promoters of the development of the idea, that they purpose the future vision.

SKY-EYE in charge of the development of one of the parts that constitute the forest prevention of fire, proposes the development of an application that serves like example of tracking station, able at any moment to control the location of the airplane, to control the flight plan and mission to make. This way it would to a great extent facilitate the accomplishment of the study to control the fire and to avoid his propagation.

The development of the application participates in three differentiated scopes: modelization of the flight plan and mission, user interface for the pursuit and mechanism of georeferencing/orthonormaliced of the captures information. In this project one describes to the development of the georeferencing and orthonormaliced of sound-ranging and photographic information to be located in the cartographic zone on which the flight plan is executed.

The document contributes a study of the diverse tools of geographic information to be to select agreed to project SKY-EYE. This tool will suppose the base of the tracking station and from her the diverse tasks of implementation were developed.

The project made a study of the methodology of georeferencing of aerial images as well as of their rectification and describes to the process of implementation and tests of its development.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1. CONTEXTO GENERAL Y PLANIFICACION	3
1.1 Escenario	3
1.2 Visión.....	4
1.3 Estado de la Tecnología	4
1.4 Motivación.....	8
1.5 Objetivos	9
1.5.1 Objetivos generales.....	9
1.5.2 Objetivo individual	10
1.6 Planificación	11
1.6.1 División en fases	11
1.6.2 Costos.....	13
1.7 Metodología de trabajo	14
CAPITULO 2. ESTADO DEL ARTE	15
2.1 GIS	15
2.1.1 Criterios de selección	15
2.1.2 Selección de los candidatos.....	16
2.1.3 Elección Final - ESRI ArcGis Engine	17
2.2 Plan de Vuelo y misión	19
2.3 Estación de seguimiento.....	21
CAPITULO 3. ANALISIS Y PLANIFICACION	23
3.1 Análisis.....	23
3.1.1 Imagen Digital.....	23
3.1.2 Georeferenciación	24
3.1.3 Correcciones geométricas.....	27
3.2 Objetivos	31
3.3 Planificación	32
3.4 Costes Individuales.....	34
CAPITULO 4. ESPECIFICACION Y DISEÑO.....	35
4.1 ESRI Arcgis Runtime DevelopmentKit.....	35
4.1.1 Arquitectura de Software.....	35
4.1.2 Librerías.....	37
4.1.3 Subsistemas de Librerías	38

4.2 Ortoimágenes	41
4.2.1 WorldFile para RasterDataset	42
4.3 Estructura de la aplicación	43
4.3.1 Modelo de capas	44
4.4 Diagramas de clases	45
CAPITULO 5. IMPLEMENTACION, PRUEBAS E INTEGRACION	47
5.1 Implementación	47
5.1.1 Paquetes de Misión	47
5.1.2 Visualización de las coordenadas de la posición del avión	48
5.1.3 Proyección de las coordenadas del avión.....	48
5.1.4 Área de proyección.....	48
5.1.5 Georeferenciación de la imagen	49
5.1.6 Rectificación de la imagen.....	49
5.1.7 Geotransformacion mediante puntos de control	50
5.2 Pruebas Unitarias	50
5.3 Integración	52
CAPITULO 6. BALANCE	53
6.1 Planificación	53
6.2 Costes	54
6.3 Posibles mejoras	57
CAPITULO 7. CONCLUSIONES	58
7.1 Objetivos Generales	58
7.2 Objetivos individuales	58
7.1 Conclusiones generales	59
7.2 Conclusiones individuales	60
7.3 Estudio de la ambientalización.....	60
BIBLIOGRAFIA	62
ANEXO	64
A. Selecciones de GIS	64
B. ArcGis Engine	66
C. Desarrollos matemáticos	69
D. Desarrollos de implementación	75

INTRODUCCIÓN

Hoy en día se pretende tener un control riguroso de los incendios que se pueden ocasionar, con el fin de obtener en el menor tiempo posible y con el mayor acierto el control de éstos y su eliminación.

De la idea de poder recopilar información aérea para facilitar la eliminación de los incendios por parte del órgano profesional encargado de esta tarea, nace el cometido de desarrollo de un sistema electrónico embarcado en un avión no tripulado, también denominado UAV (Unmanned Aerial Vehicles).

SKY-EYE es un proyecto que se centra en el desarrollo de la plataforma embarcada del UAV, de la estación de control del vuelo, de la estación de procesado de la información y de la infraestructura de comunicaciones.

En base a SKY-EYE se propone el desarrollo de un software que implemente una estación de seguimiento. Éste proyecto lo componen Juan Manuel Lema, Borja López y Miriam González.

La aplicación, debería dar soporte a la ubicación en todo momento del avión durante el transcurso del vuelo, integrada en un GIS (sistema de información geográfica) para disponer de toda aquella información relevante. Debe aportar una visualización del plan de vuelo a realizar por el avión, la misión que se ejecutará y una disposición de parámetros característicos del UAV. La plataforma ha de ser capaz de recopilar, posiblemente en tiempo real, la información que se requiera durante el transcurso de su vuelo y una posterior ubicación georeferenciada de la misma. Por tanto, de manera aclaratoria, el desarrollo de la aplicación se compone de tres partes diferenciadas: la disposición del plan de vuelo y su misión, el seguimiento del avión en el transcurso del vuelo y la georeferenciación de la información fotográfica capturada desde el aire, todas ellas realizadas por cada uno de los tres estudiantes implicados en su desarrollo.

El desarrollo de este proyecto es en base a la georeferenciación de fotogramas, imágenes tomadas desde el aire con el fin de proporcionar información sobre el estado del incendio y con su posterior visualización sobre la cartografía correspondiente del terreno sobre el que se vuela.

El proyecto además de estar basado en un desarrollo de software requiere de un análisis tecnológico de las metodologías utilizadas para su cometido, siendo de gran importancia la dedicación de todo un capítulo al análisis del problema de la georeferenciación y ortonormalización las imágenes para obtener el conocimiento necesario para su posterior implementación. El contenido del proyecto se describe a continuación

El primer capítulo se encarga de adentrar a la necesidad del desarrollo del proyecto en su conjunto. En él se presentan los objetivos marcados de manera global para tener un buen conocimiento de lo que se pretende realizar y qué

aportan los objetivos específicos de este proyecto. Presenta una planificación inicial y una estimación de los costos.

El segundo capítulo plasma los antecedentes que se han de conocer para realizar el proyecto. Esto se refiere a concretar en detalle los sistemas de información geográfica disponibles, plan de vuelo, misión y estación de seguimiento.

En el tercer capítulo se presenta el análisis del problema, conocimientos necesarios para afrontar la georeferenciación de imágenes aéreas. Además, se describe la planificación a seguir así como objetivos marcados y costes del proyecto.

El cuarto capítulo de diseño, se detallan cuales serán las funcionalidades de la herramienta utilizada.

El quinto capítulo se desarrolla la implementación, pruebas e integración de las partes de la aplicación.

Los capítulos seis y siete corresponden a los balances y conclusiones. Estos recogen todo el proceso durante el desarrollo del proyecto, detallando las diferentes decisiones tomadas así como los objetivos conseguidos y los posibles cambios sufridos por la planificación inicial, etc. Finalmente recoge las conclusiones generales derivadas de todo el proceso de desarrollo del proyecto y plantea posibles líneas de continuación del trabajo.

Por último se encuentra el anexo. En esta parte se recogen las tablas de selección de GIS, librerías de ESRI ArcGis y ejemplos de analítica de la proyección de los puntos de la imagen.

CAPÍTULO 1. CONTEXTO GENERAL Y PLANIFICACION

1.1 Escenario

Los incendios forestales han sido y son noticia de gran importancia por su difícil control y peligro para el ser humano y el medio ambiente. Constituyen una gran materia de estudio de cara a la implementación de nuevas tecnologías que conlleven a una mejora en el complicado proceso de su control.

Actualmente las medidas utilizadas en nuestro país de cara a solventar este problema fundamentalmente están basadas en medios terrenales para la realización de su estudio además de llevar a cabo su extinción.

El principal medio terrenal para afrontar los incendios corresponde a los camiones cisterna [Fig 1.1.1]. Vehículos con gran capacidad para almacenaje de agua, utilizados por bomberos para la extinción del fuego.

Las estaciones de control son las encargadas de dar un soporte comunicativo entre los diferentes grupos que forman toda la entidad de actuación contra el incendio. En ellas se encuentra el coordinador del estudio y toma de decisiones, con el consecuente abandono de las mismas de cara al estudio aéreo.

Los medios aéreos utilizados corresponden a aviones/helicópteros bombarderos [Fig 1.1.1], que requieren de la presencia de personal para su pilotaje. Realizan eventualmente pasadas de control para la prevención de incendios, teniendo una comunicación constante con la estación de control.

Los helicópteros bombarderos reducen en gran escala la propagación del fuego. Se utilizan para recorrer zonas afectadas y realizar un estudio global de la zona. Estos mecanismos requieren de horarios limitados de cara a un buen estudio del incendio ya que el control de los incendios en horario nocturno es difícil de efectuar por los pilotos.



Fig.1.1.1 Camión cisterna y Helicóptero bombardero

1.2 Visión

Actualmente la idea de aviones no tripulados se está ejecutando fundamentalmente en el ámbito militar. Estas organizaciones disponen de medios económicos y tecnologías muy avanzadas que aportan resultados muy satisfactorios de cara al control aéreo sin necesidad de un piloto embarcado.

Para que en gran medida se tenga un control a disposición de cualquier órgano de actuación contra incendios forestales, mediante recopilación de información aérea, se requiere que todos los dispositivos integrados en esta tarea converjan de una manera satisfactoria.

En una visión futura se pretende disponer de un sistema embarcado en un avión no tripulado, que aporte módulos de control de vuelo, de misión y toda la carga de captación de información (cámaras, sensores...).

Se dispondrá de un conjunto global de estudio y recopilación de información cuya utilización puede abarcar diferentes áreas de análisis aunque originalmente está diseñada para incendios forestales.

Los UAVs serán controlados por estaciones de seguimiento unidas a las de control que dispondrán de la información recopilada y serán las encargadas de todo el control de la carga útil (payload) del avión así como del plan de vuelo y misión a ejecutar.

La imagen presentada a continuación corresponde a una visión general de este cometido, en tareas de apoyo a la extinción de incendios. Aportando una idea de la utilidad y servicio que puede proporcionar.

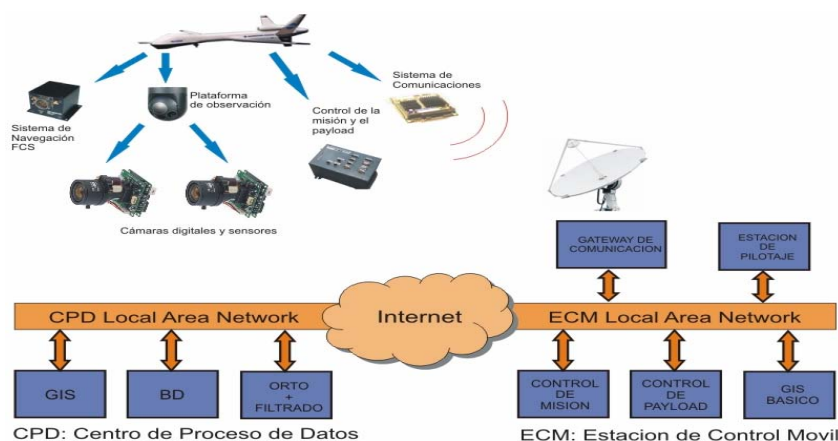


Fig. 1.2.1 Visión general del desarrollo de la aplicación

1.3 Estado de la Tecnología

Este apartado se encarga de introducir y detallar las tecnologías presentes en la actualidad, utilizadas con el fin de obtener un buen resultado en la integración del proyecto.

Unmanned Aerial Vehicles:

Unmanned Aerial Vehicles (UAV) como se introdujo anteriormente corresponde a la expresión inglesa, que identifica a los aviones capaces de volar sin la necesidad de pilotos. Los UAV se encuentran activos principalmente en el ámbito militar, encontrándose una diversidad de modelos de cara a realizar estudios de reconocimiento territorial.

Son vehículos que nacen de la idea de propiciar una mejora de cara a las debilidades presentes en aviones tripulados, como el alto coste de su mantenimiento además de los riesgos que pueden aparecer en situaciones peligrosas. Proporcionan un mantenimiento reducido y la posibilidad de ser controlados desde cualquier posición de manera automática y en condiciones de luz y/o atmosféricas en las que los pilotos no pueden volar.

Actualmente los países que apuestan por esta tecnología principalmente son EEUU, Japón y Australia, que los utilizan en otros campos además del militar, como puede ser el uso civil en el caso de Australia para fines de evaluación medioambiental o en el campo de investigación científica promovido por NASA (EEUU).

Ante la existencia de diversas entidades en su estudio, los UAVs corresponden a una de las grandes líneas de investigación aeronáutica, marcándose diversos ámbitos de aplicación en el campo civil. Utilizados para control de fronteras o líneas de costa, para combatir el contrabando, para supervisiones medioambientales, control/prevención de catástrofes.

Existe una clasificación de los aviones según su alcance. Diferenciándose entre UAVs tácticos, UAVs especializados y UAVs de largo alcance.



Fig. 1.3.1 UAV en pleno vuelo

Los UAVs ejecutan de forma precisa una ruta o disposición de plan de vuelo ya estipulado con anterioridad y con la posibilidad de ser modificado en el acto. La evolución de la telemetría es controlada por estaciones de control, cuya información es transmitida por el mismo avión.

GIS:

Un sistema de información geográfica se corresponde con a un conjunto que proporciona hardware, software y procedimientos diseñados para realizar la captura, almacenamiento, manipulación, análisis, modelización y presentación de datos referenciados espacialmente para la resolución de diferentes problemas de planificación y gestión. Son programas que trabajan con una metodología propia y poseen un núcleo teórico importante en el que se combinan conceptos de diferentes disciplinas (topología, estadística espacial, geometría computacional).

Proporcionan diferentes maneras de almacenaje de información como pueden ser los modelos raster y vectorial, cuyas características son:

- ♦ **Modelo Raster:** El modelo *raster* centra su interés más en las propiedades del espacio que en la representación precisa de los elementos que lo conforman. Para ello estructura el espacio en una serie de elementos discretos por medio de una retícula regular, generalmente compuesta por celdas cuadradas, también llamadas 'pixels'. Cada una de esas celdas se considera como indivisible y es identificable por su número de fila y columna.

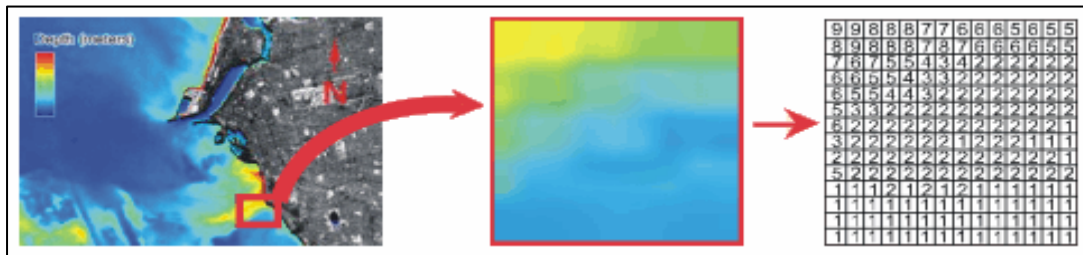


Fig. 1.3.2 Visión general del desarrollo de la aplicación

Los elementos en el mundo real se representan mediante una o varias celdas. Los límites geográficos se pueden deducir por los valores de las mismas. Sin embargo la falta de exactitud a la hora de localizar los elementos es uno de los mayores inconvenientes del modelo raster ya que requiere unas amplias necesidades de almacenamiento para las coordenadas X e Y de las celdas.

Una capa constituye un conjunto de celdas y sus valores asociados. Las celdas sólo registran un único valor por tanto para almacenar información de distintas variables, se añadirán tantas capas como variables a considerar.

- ♦ **Modelo Vectorial:** Representa cada objeto geográfico de forma independiente mediante gráficas (líneas, puntos y polígonos), codificando explícitamente el límite que los separa del entorno. Estas gráficas se caracterizan por:

- ◆ Elementos que definen su punto mediante coordenadas x, y.
- ◆ Elementos formados por uno o más segmentos lineales que se unen en vértices representados por coordenadas x, y.
- ◆ Elementos superficiales representados mediante coordenadas x, y de los vértices de líneas que forman su perímetro.

Sistemas de control de vuelo:

Son sistemas que se encargan de controlar el vuelo del avión. El sistema consiste en un mecanismo de manejo en la cabina de control, el enlace físico, y los dispositivos necesarios para controlar una aeronave en vuelo. Es un mecanismo altamente complejo el cual se dedican empresas especializadas y muy concretas.

Actualmente las diversas empresas encargadas de ofrecer pilotos automáticos para UAVs incluyen sensores (IMUs, GPS, etc.) dentro del mismo dispositivo para obtener con buenos resultados el desarrollo de su función, ya sea en la estabilidad del avión como en la ejecución del plan de vuelo.

Los sistemas de pilotos automáticos más representativos hoy en día y empresas encargadas en su distribución en el mercado son UAVNavigation, presenta el AP04, piloto pensado para UAVs. Micropilot, dispone del MP2028g, piloto más pequeño del mundo. Cloud Cap Technology, aporta dos sistemas de piloto automático como es el PiccoloPlus y Piccolo2. UAV Flight System, proporciona el AP50.

Sistemas de Visión Remota:

Los distintos sistemas de visión remota corresponden a las cámaras de video, infrarrojos y sensores termales.

Hoy en día existe un gran abanico de oferta respecto a la utilización de cámaras termales para la captura de imágenes con ciertos valores de temperatura. Estas se encargan de recopilar la información visual con características térmicas, para obtener un buen análisis del terreno con incendios.

Las cámaras térmicas capturan imágenes nítidas y enfocadas con una cierta sensibilidad de 0.08°C . Realizan capturas con diferencias termales extremadamente pequeñas en alta resolución y mantienen la imagen libre de ruidos aun después de largos periodos de operación [Fig 1.3.3].

Las cámaras pueden disponer de sensores infrarrojos con finalidad de un mayor control de recopilación de información con diferencias de temperatura para un mejor estudio del terreno.

Las modalidades van relacionadas con las necesidades del usuario sirviendo como ejemplo la posible utilización incluso de cámaras comerciales con un

rango de entre -10°C hasta 2000°C suficientes para la mayoría de las aplicaciones.

Los sensores disponibles más actuales gracias a su tecnología corresponden a los CMOS, que integran funciones de control de luminosidad, corrección de contraste y conversión analógico-digital [Fig 1.3.3].

Tienen un consumo eléctrico ínfimo respecto a sus competidores y además son muy económicos. Los píxeles pueden ser expuestos y leídos simultáneamente, proporcionan una mayor flexibilidad en la previsualización.

La combinación de estos sensores proporcionará imágenes utilizadas por los GIS que contendrán información tanto de día como de noche ya que detectarán el calor emitidos por las llamas.



Fig. 1.3.3 **Cámara térmica y sensor CMOS**

Sistemas de comunicación:

La infraestructura de comunicaciones será una mezcla de enlaces de comunicación para garantizar en la medida de lo posible el contacto del UAV con las estaciones de control.

La idea es que se pueda controlar la ejecución de la misión en todo momento y se podrá transmitir información adquirida por los sensores.

Existe una serie de candidatos a utilizar dependiendo del tipo de comunicación y/o transmisión de información. Estos corresponden a WiFi, Wimax, HSDPA, UMTS, GPRS, etc. Su selección dependerá de sus costes, radio de cobertura, seguridad... En todo caso es una tarea a realizar por el grupo ICARUS de la UPC.

1.4 Motivación

Durante estos años de carrera he ido adquiriendo diversos conocimientos sobre lenguajes de programación, llegando al punto de poder interactuar mediante las asignatura de LP II y DSEM con el lenguaje orientado a objetos, denominado C#, sobre la plataforma .NET. Un lenguaje bien desarrollado que,

aporta grandes satisfacciones a la hora de realizar todo tipo de aplicaciones de escritorio, web, para dispositivos empotrados y móviles, etc.

La idea de poder realizar un proyecto que requiriera los conocimientos de programación adquiridos y aportase en gran cantidad otros elementos totalmente desconocidos, hizo que tuviera gran interés en realizarlo.

Tener opción a investigar una materia como la aeronáutica y sistemas relacionados para el diseño e implementación de una estación de seguimiento, supuso una buena opción a adquirir conocimientos interesantes un poco alejados de lo que estaba tratando hasta el momento y fueron motivos muy atractivos para tomar la decisión de iniciar el proyecto.

No tenía bien claro el tipo de proyecto a realizar, y la idea de seguimiento de un UAV, brindaba la posibilidad de poder desarrollar habilidades en la organización y planificación de las tareas, tomar desenvoltura en la búsqueda y procesado de diversa información y no menos importante, realizar un trabajo en grupo y toma de decisiones comunes.

Sin embargo la principal motivación del proyecto fue participar en una empresa dedicada a la consultoría que estaba formada por un personal muy cualificado en la realización de proyectos y presentaban un proyecto (SKY-EYE) muy atractivo. La idea de aprender metodologías de trabajo en equipo, conocer el ambiente y capturar todo tipo de aprendizaje respecto al ámbito laboral, tanto en el desarrollo de documentación como en la manera de actuar y desenvolverse, fueron motivos decisivos del interés.

1.5 Objetivos

Este apartado plasma de una manera general las metas que se pretenden conseguir al finalizar el proyecto.

1.5.1 Objetivos generales

Habitualmente los bomberos, órgano encargado para actuar frente a los incendios, se encuentran limitados en las tareas de control de propagación, extinción o prevención, ya que utilizan metodologías anticuadas de identificación visual de los objetivos. En gran parte de nuestro país los recursos utilizados para la extinción de incendios corresponden a la utilización de camiones cisterna y helicópteros/aviones bombarderos carentes de equipos electrónicos especializados en la transmisión de datos con estaciones de control debido a la dificultad de certificación con autoridades competentes.

Gran parte de las limitaciones vienen provocadas por una serie de factores externos, fruto de las quemaduras o fenómenos ambientales, los cuales son difíciles de controlar o directamente no se pueden.

Una serie de deficiencias se encuentran presentes en los incendios y que fueron motivo de la búsqueda de herramientas visuales y aéreas, pueden ser:

- ◆ Los medios terrestres que implican gran peligro para aquellas personas encargadas de sofocarlos además de ser una tarea difícil de planear al no disponer de una recopilación de información muy exacta.
- ◆ El humo que interfiere a la hora de obtener información coherente sobre la situación.
- ◆ La utilización de aviones pilotado que se ven perjudicados en horas de reducida visibilidad, con disposición de un tiempo limitado de vuelo, escasez de sensores para recopilar información, etc.
- ◆ El abandono del coordinador de la zona de control a causa de la necesidad de realizar de manera personal una visión global de la situación mediante métodos aéreos.
- ◆ La precariedad de las comunicaciones entre órganos de extinción, fundamentalmente en áreas montañosas.

La dedicación de personal para prevenir este problema resulta a veces de gran ineficiencia ya que se malgastan esfuerzos en unas determinadas tareas que se podrían realizar de una manera automatizada y con mejores resultados.

El objetivo general del proyecto SKY-EYE trata de crear un prototipo que recoja un sistema abordo, estación de control y estación de seguimiento. Pretende diseñar un sistema de embarcado en un UAV que sea capaz de capturar información a través de cámaras fotográficas, de video, etc, implementar una estación de seguimiento para controlar todo el sistema y construir un sistema de transmisión de datos entre UAVs y estaciones de control.

De cara a los objetivos de SKY-EYE, el objetivo global para los tres TFCs corresponde a la implementación de una aplicación que sirva de control del seguimiento del plan de vuelo, misión y procesado de la información capturada por el UAV. Se divide en lo siguiente:

- ◆ **Seguimiento del vuelo y misión:** Representar planes de vuelo para poder sobrevolar la zona afectada y localizar en cada momento la posición del avión. Se encargara del seguimiento de la navegación, objetivos y llevar a cabo la misión. Esto conlleva al análisis de datos telemétricos, de información capturada o disponible en la misión y su posible utilización.
- ◆ **Procesado de la información:** Se refiere a la manipulación de las imágenes recibidas desde la plataforma del UAV. Estas imágenes recibirán transformaciones para poder ser integradas en sistemas de información geográfica y realizar un análisis y estudio del incendio.

La integración de los objetivos dará como resultado una estación de seguimiento para el estudio de incendios forestales.

1.5.2 Objetivo individual

El objetivo principal de mi proyecto es la realización del procesado de la información, para el posterior análisis del estado del incendio. Este proceso

comprende la aplicación de transformaciones a las imágenes capturadas además de un ajuste de coordenadas y puntos de control previamente obtenidos.

Los objetivos dispuestos de una manera más específica, es poder georeferenciar y ortonormalizar. La idea fundamental es conseguir poder analizar información georeferenciada en una cartografía sobre la cual el UAV ejecutará un plan de vuelo. Por tanto es de total importancia conseguir realizar las transformaciones necesarias sobre la imagen para poder ubicarlas en las posiciones que correspondan. Se diferencian varios objetivos a conseguir, desarrollados en el capítulo de análisis.

Se realizará un estudio y análisis de la teoría de georeferenciación y ortonormalización de información, así como de la fotogrametría aérea necesaria para conversión de coordenadas y localización de puntos de control.

Finalmente se pretende obtener ortofotos, imágenes que aportan información georeferenciada.

1.6 Planificación

La planificación del trabajo adentrará a la manera sobre la que se va a desarrollar el proyecto. Dará una visión general de los objetivos marcados en fechas concretas y de los pasos a seguir para llegar al objetivo.

1.6.1 División en fases

Al inicio del proyecto se propuso una planificación que se dividía en 10 fases, explicadas a continuación y recogidas en la figura 1.6.1 con la durabilidad que se estimaba. La planificación consta de etapas comunes de los tres proyectistas y etapas individuales. Las etapas realizadas por cada integrante se realizaran de manera simultánea.



Fig. 1.4.1.1 Planificación inicial

1. **Estudio y comprensión del problema:** Esta etapa se encarga de adentrarse en comprender el escenario, lo que se espera conseguir.
2. **Análisis detallado del estado del arte:** Realización de un estudio de las diversas herramientas GIS disponibles, además de analizar las características más representativas a tener en cuenta de cara al proyecto general y realizar una primera selección.
3. **Evaluación de sistemas GIS:** Análisis minucioso de la primera selección de la fase anterior con el fin de conseguir la herramienta que finalmente se utilizará en el proyecto SKY-EYE.
4. **Especificación y plan para las fases posteriores:** Asignación de objetivos globales e individuales, la arquitectura de la solución técnica y la elaboración de especificación.
5. **Georeferenciación de información:** Etapa individual. Procesado de la información y su posterior ubicación en una cartografía.
6. **Diseño del lector del plan de vuelo:** Etapa individual. Modelado, almacenaje y procesamiento del plan de vuelo y gestión de cartografías e imágenes.
7. **Diseño GUI de la estación de seguimiento con GIS:** Etapa individual. Visualización del seguimiento del avión así como de la disposición en pantalla de las características de la aplicación.
8. **Desarrollo de componentes:** Realización de pruebas individuales y conjuntas que darán como resultado final, la estación de seguimiento.
9. **Integración:** Integración de las partes individuales del sistema y la ejecución de las respectivas pruebas generales.
10. **Documentación de los TFCs:** Generación, por cada integrante, de la memoria de su proyecto, además de la elaboración de una presentación común.

Cada etapa contará con documentación elaborada por los tres proyectistas que recoja los resultados obtenidos e irá seguida de una revisión por parte de responsable de los mismos.

Hay que tener en cuenta que es una planificación inicial y de que se pueden producir cambios en ella debido a la necesidad de una mayor/menor dedicación de tiempo en las diversas tareas.

Constatar que algunas tareas van enlazadas, requieren de una dedicación y obtener resultados, antes de abarcar las siguientes. Las tareas 1, 2 y 3 son tareas relacionadas. Para ser afrontadas, requieren de la finalización de la fase anterior. Las etapas 5, 6 y 7 son afrontadas al mismo tiempo, se desarrollan de manera independiente por cada integrante del grupo.

1.6.2 Costos

Se ha de realizar un análisis de los costos que puede implicar la realización del proyecto, incluyendo la adquisición de maquinaria, software, etc.

Se evaluará los posibles costes de desarrollo de la aplicación. Éstos se pueden agrupar en dos ámbitos, que corresponden a la inversión inicial por parte del material necesario y al coste por horas trabajadas correspondiente a las personas implicadas.

Los grupos protagonistas de los costes del desarrollo de la aplicación son los siguientes:

◆ Inversión Inicial:

- Se necesitarán tres equipos para cada una de las personas que realizan el proyecto. Una posible opción de los ordenadores correspondería a Procesadores Intel Pentium D 805 a 2.66GHz, 1024MB de memoria, 160GB de disco duro, Grabadora DVD.
- Tres monitores TFT de 19", con resolución 1280x1024.
- Licencia de Microsoft Share Point para tener acceso a un portal común. Los implicados en el proyecto, dispondrán de este espacio para recopilar toda la información del proyecto.
- Licencias de uso para Microsoft Windows XP, Microsoft Office y la del entorno de desarrollo que se utilice.
- Licencias de uso de librerías de herramientas GIS.
- Material de oficina correspondiente a folios, CDs, etc.

Tabla 1.6.2.1 Costes de material

Material	Precio	Unidades	Total
Computadoras	1.000 €	3	3.000 €
Licencia Windows XP	159 €	3	477 €
Licencia Microsoft Office 2007	450 €	3	1.350 €
Licencia Entorno de desarrollo	Por determinar		
Licencia Librerías GIS	Por determinar		
Licencia Share-point			2000 €
Materiales de oficina			500€
Coste total [Euros]			7.327 €

- ◆ **Recursos humanos:** Corresponde a la inversión más representativa del proyecto. Se requiere a 9 personas para el desarrollo del proyecto, 3 analistas, 3 programadores y 3 documentadores. Forman tres grupos con

tareas diferentes y por tanto los salarios no son equitativos. La tabla 1.6.2.2 recoge el coste del personal requerido dependiendo de la función que realiza.

El total de horas realizadas por cada persona se contabiliza sin contar fines de semana y trabajando 25 horas semanales, una media de 5 horas diarias en los días trabajados. El total de horas corresponde a 445h.

Tabla 1.6.2.2 Costes estimados para recursos humanos

Desarrolladores	Implicados	Horas	€/Hora	Coste Total
Analistas	3	130	32	12.480 €
Programadores	3	235	25	17.625 €
Documentadores	3	80	20	4.800 €
Coste total [Euros]				34.905 €

Los costes indicados referentes a las horas de cada integrante del equipo son estimados ya que pueden ser variables dependiendo de la empresa en la que trabajen.

Finalmente el coste total para llevar a cabo el proyecto supone un valor de 40.405€.

1.7 Metodología de trabajo

Durante todo el desarrollo del proyecto se dedicará una media de 3 horas a la semana para revisión de las tareas efectuadas durante la semana anterior. Se realizara una reunión semanal con el/los responsable/es del equipo de proyectistas para evaluar las tareas realizadas y concretar los objetivos siguientes a realizar.

El equipo de SKY-EYE dispondrá de herramientas (portal en Internet) y colaborativos para ir almacenando toda la información correspondiente al proyecto, y así poder tener fácil acceso por todos los integrantes.

La idea es tener un tipo de seguimiento continuado para poder tomar decisiones a partir de los resultados de los objetivos a corto plazo. De esta manera se podrá tener un mayor rendimiento por todos los participantes.

El equipo SKY-EYE, para conseguir tener un buen seguimiento de todo el desarrollo del proyecto, realizará cada semana, previo a la reunión, una orden del día para concretar y preparar los puntos a tratar. Posteriormente a la reunión recogerá en un acta todos los apartados tratados, conclusiones y objetivos a corto plazo.

CAPITULO 2. ESTADO DEL ARTE

Este capítulo se encarga de describir las metodologías de selección de la herramienta GIS, describir las características más relevantes del plan de vuelo, misión y estación de seguimiento.

2.1 GIS

Es un sistema de información geográfica que proporciona diversidad de funcionalidades para el trato de archivos raster y vectoriales. Disponen de una presentación visual para el usuario y de herramientas ya diseñadas sin posibilidad de cambio [Fig 2.1.1].

Además de GIS existen librerías de desarrollo que aportan facilidades para la propia implementación de la aplicación utilizando sus herramientas, metodologías, etc.

La estación de seguimiento debe correr sobre un sistema de información geográfica. Para conseguir la selección de la herramienta más acertada, se realiza un estudio de las características de los diferentes GIS y librerías disponibles en relación a las necesidades del proyecto.

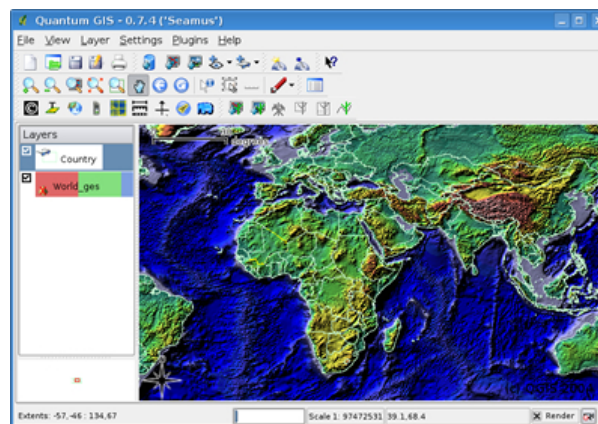


Fig 2.1.1 Ejemplo herramienta GIS (Quantum)

2.1.1 Criterios de selección

Los criterios de selección tienen diferente peso a la hora de escoger la herramienta adecuada. Veámoslo en la lista siguiente:

- ◆ **Gestión de BBDD:** Se debe disponer de una base de datos para poder realizar búsquedas, insertar/eliminar información de los elementos, geográficos o no, que interesen.

Tiene un valor del 15% ya que es de buena utilidad disponer de una base de datos para almacenaje de la información frente a un sistema de ficheros.

- ◆ **Programabilidad / Código Abierto:** El lenguaje utilizado para el desarrollo del GIS debería ser conocido o fácilmente entendible.

Tener total libertad de uso del código para la realización de modificaciones si se cree oportuno, además del aprendizaje de su metodología. En caso contrario otra opción es disponer de una API que exponga la funcionalidad desde el punto de vista de la programación.

Esta característica tiene un nivel de importancia muy elevado, el mayor de todos los criterios. Corresponde a un 40% ya que es necesario disponer del código del GIS para el uso que se requiera además de ser desarrollado en un lenguaje conocido o de fácil comprensión.

- ◆ **Formatos:** se requiere de diversidad de formatos para así poder tratar sin problemas cualquier tipo de información. Representa el 20% del total.
- ◆ **Licencias:** Algunos GIS requieren ser comprados para tener acceso a su código. Interesa disponer de uno de código abierto que no suponga ningún coste o que sea poco elevado. El porcentaje correspondiente a esta característica es del 15%. No es el más elevado pero si es representativo en la selección del GIS ya que interesa que no suponga una inversión importante para su uso.
- ◆ **Sistema Operativo:** Este aspecto a tener en cuenta no supone ningún obstáculo de selección ya que se podrá trabajar con el GIS independientemente del sistema aunque es preferible que sea Windows. Su valor respecto al total corresponde al 5%.
- ◆ **Georeferenciación/Ortonormalización:** Disponer de una herramienta capaz de ubicar en un mapa cartográfico imágenes aéreas será una característica que incremente su selección. Tiene un porcentaje del 5% ya que no es característica muy importante para la toma de decisión ya que se podría realizar el desarrollo de mecanismos para llevarla a cabo.

2.1.2 Selección de los candidatos

Al no ser objetivo de mi proyecto la profundización en la selección del GIS, se omite el desarrollo del estudio característico de las herramientas analizadas ya que son un número bastante elevado. Los GIS analizados corresponden a: ArcGIS, gvSIG, MAPWINDOW, ERDAS, Oracle Spatial y Oracle Locator, PostGis + PostGreSGL, GeoServer, HidroGIS, Kosmos, MapMaker, JUMP, GRASS, Spring, E-Foto, QUANTUM, THUBAN, UDIG, TerraLib+ TerraView, SAGA, Miramon.

Ante los criterios de selección del apartado anterior el número de herramientas GIS queda reducido en la tabla del anexo [Anexo A.1], descartando aquellos que no dispongan estas características o no que sean acordes a las necesidades con el proyecto.

Una vez se ha tenido la primera selección de candidatos, se tienen aquellos que cumplen con funcionalidades que son de utilidad. Seguidamente se hace un análisis en cuanto a ventajas y desventajas de las características de cada uno de ellos con el fin de conseguir una lista reducida y analizarlos profundamente. La tabla propia a esta segunda selección se encuentra en el anexo [Anexo A.2].

Los candidatos resultantes se describen a continuación:

- ◆ **GvSig:** Visualizador de todo tipo de formatos y de licencia GPL. Muy adaptado a nuestras necesidades, con soporte técnico y en vías de desarrollo. Carece de tratador de imágenes raster para georeferenciación y ortonormalización.
- ◆ **ArcGis Explorer y ArcGis Engine:** Pertenece a la empresa ESRI, visualizador de mapas muy completo y API para la plataforma .NET para desarrolladores. Consta de metodologías de georeferenciación y ortonormalización. La licencia de desarrollo de EDN es de 1750 € mas costes de licencia en ejecución.
- ◆ **PostGis:** Basado en la base de datos PostGreSQL muy desarrollada y de código abierto. Corresponde a un software GNU.
- ◆ **MapMaker:** Software muy desarrollado en cuanto al tratado de capas y asociación de tablas de bases de datos a capas raster. El principal inconveniente es no tener acceso al código fuente para analizarlo.
- ◆ **Grass + Quantum:** Softwares que integrados son un GIS muy completo con funcionalidades muy propias para el proyecto. Su principal inconveniente es estar realizado en lenguaje C++, lenguaje poco conocido por los miembros del equipo.

Otras posibles soluciones de selección corresponden a las librerías THUBAN o TerraLib. Para llevar a cabo la implementación de la aplicación se tiene que partir prácticamente desde cero, por tanto ocasionan una pérdida de tiempo al tener que resolver funcionalidades ya desarrolladas.

Finalmente la última opción de selección es integrar algún GIS con e-photo para obtener opción a la georeferenciación y ortonormalización fotogramétrica.

2.1.3 Elección Final - ESRI ArcGis Engine

La elección final resulta del estudio de los candidatos de la segunda selección de GIS. Se realizan una serie de pruebas técnicas sobre los softwares para la determinación definitiva de la elección. Éstas corresponden a:

- ◆ Carga de cartografías de diferentes formatos (mxd, shp, sid ..).

- ◆ Carga de ortofotos de diferentes formatos (tiff, jpg,dem...).
- ◆ Carga de cartografías a través de Internet (WMS, WFS, WCS, ArcIMS).
- ◆ Carga de ortofotos a través de Internet.
- ◆ Creación de capas y sus funcionalidades.
- ◆ Conexión con BBDD.
- ◆ Guardar información en BBDD.
- ◆ Georeferenciación.
- ◆ Analizar la estructura de código fuente.

La selección de la herramienta dependerá de los resultados obtenidos de las pruebas realizadas sobre los candidatos finales, de manera que el que mejor disponga de estas necesidades será el elegido.

Las evaluaciones finales de los candidatos se aprecian a continuación:

GvSig: Dispone de una correcta visualización de cartografías y ortofotos a nivel local como por Internet de diversidad de formatos, tiene un avanzado funcionamiento de creación y edición de capas y proporciona interoperabilidad con diversos tipos de datos. Por el contrario carece de herramientas de georeferenciación y modelos de elevación.

El código fuente se debe compilar en Eclipse ya que es una herramienta diseñada con código Java basada en archivos de configuración XML siendo idónea como solución multi-plataforma.

Eclipse provee de Frameworks y servicios por el que todos los plug-ins pueden ser creados. También tiene un runtime en el que los plug-ins son cargados, integrados y ejecutados. El principal propósito de Eclipse es permitir que otros programadores puedan crear fácilmente sus herramientas.

MapMaker: Dispone de una amplia funcionalidad del tratado de capas, creación, asociación y consulta a bases de datos u hojas de cálculo que hacen de la capa en la cual se esté trabajando un archivo con numerosa información territorial. Gran abanico de formatos disponibles para la importación/exportación de modelos raster y vectoriales. Herramienta de georeferenciación poco desarrollada.

Imposibilidad de realizar un estudio del código fuente, para ello se necesitará realizar la compra de su licencia.

Quantum: Gran abanico de herramientas que pueden aportar gran ayuda al proyecto y utilización de la aplicación es predecible y amigable para poder

realizar diversas tareas. La implementación de las capas es bastante completa, proporciona configuración, edición y visualización.

La opción de georeferenciar no es eficaz. Esta limitado a solo una manera de rectificar las fotografías y es sabiendo previamente las coordenadas de mínimo dos punto de la imagen cargada. No estaría de más que se pudiera georeferenciar sabiendo la escala o puntos de referencia de las esquinas de la imagen, en cualquier caso la herramienta es eficiente.

El código fuente es bastante caótico, está organizado por carpetas pero de una manera poco eficiente a la hora de buscar el código de alguna función en concreto. Por ser en C++ desde nuestro punto de vista, pierde mucho su valor a la hora de seleccionarlo, aspiramos a otros lenguajes más actuales.

TerraLib: Amplio abanico de desarrollo mediante sus librerías ya que dispone pocas limitaciones para la programación. Diversidad de carga y exportación de formatos raster y vectoriales. Supone una opción a realizar el programa desde cero si no se consigue llega a la elección de un GIS pero esta característica hace que sea el ultimo recurso ya que se perderá tiempo en diseño e implementación.

ArcGis Engine 9.2 Development kit: Esta API de desarrollo dispone de todas las funcionalidades buscadas por las necesidades del proyecto. El código de sus controles no es accesible pero si todas sus librerías. Estas librerías dan soporte a la visualización de elementos por pantalla, al control de archivos raster/vectoriales y todo tipo de características de un GIS.

Requiere de la compra de una licencia de desarrollo. Proporciona herramientas para el tratado de mapas y capas, como puede ser la selección de las diversas capas en una cartografía, procesa diversidad de información (gran abanico de formatos), etc.

Es una API muy completa que permite la posibilidad de diseño visual de la aplicación a partir del uso de sus herramientas y además el lenguaje utilizado es C#, de manera que es un punto muy a tener en cuenta.

Finalmente ante el resultado de las pruebas efectuadas la herramienta más acorde a las necesidades de SKY-EYE corresponde a **ArcGis Engine 9.2 Development Kit** aun suponiendo un coste adicional. Esta herramienta dará opción a realizar la estación de seguimiento sobre herramientas propias de un GIS sin necesidad de dedicar esfuerzos a funcionalidades ya desarrolladas.

2.2 Plan de Vuelo y misión

Plan de vuelo:

Plan de vuelo se refiere al recorrido que tiene que ejecutar el UAV, teniendo en cuenta una serie de características diferenciadas dependiendo de la zona, área y terreno el cual se quiera volar [Fig 2.2.1].

La ejecución de un plan de vuelo se constituye de varios elementos relacionados entre si que lo especifican. El plan de vuelo en base al proyecto SKY-EYE está íntimamente relacionado respecto a la visualización del mismo en una aplicación GUI.

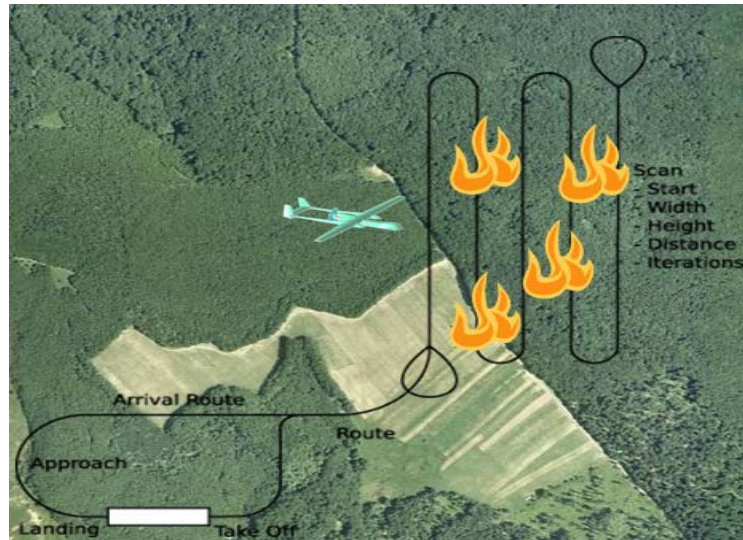


Fig 2.2.1 Plan de vuelo realizado por el UAV

El avión al despegar, se dispondrá a ejecutar el plan de vuelo en el área de la misión. Una vez allí realizará un escaneo de la zona y cuando se encuentre en el último estado del vuelo, regresará y realizará las convenientes maniobras de aterrizaje.

Como se ha mencionado anteriormente, el plan de vuelo esta formado por una serie de características que lo definen, estas corresponden a los Stages, Legs y Waypoints.

Un plan de vuelo puede estar formado por una serie de stages, como el despegue del avión, el proceso de partida, etc y estos a su vez por una colección de legs. Los legs son los encargados de especificar la trayectoria que describirá el avión para alcanzar el waypoint correspondiente. Finalmente los waypoints corresponden a posiciones geográficas, definidas en términos de coordenadas de latitud/longitud.

Misión:

Previamente a la misión se debe tener claro la zona en la que se va a realizar el vuelo para marcar el plan de vuelo. Cuando se comienza el vuelo en el lugar del incendio se analizará el perímetro de este para poder comenzar con la misión.

El plan de vuelo debe poder cambiar de forma dinámica en función de las incidencias de la misión o de cualquier factor externo. La operación de ir identificando posibles campos de emergencia, como zonas montañosas, cambios meteorológicos, etc, se realizará durante toda la misión desde el

centro de operaciones y gracias a saber la posición del avión, por el envío de paquetes telemétricos Fig [2.2.2]..

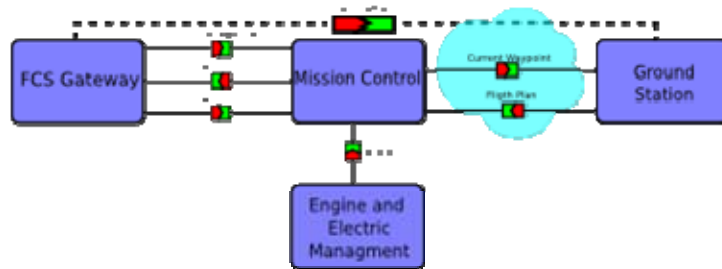


Fig 2.2.2 **Modelo de envío/recepción de paquetes de información**

La misión se encarga de poner en marcha las cámaras termales para ir adquiriendo imágenes mediante un mapeo. Esta información fotográfica irá acompañada de información geográfica, ambas relacionadas pero guardadas de manera independiente en el disco duro [Fig 2.2.3].

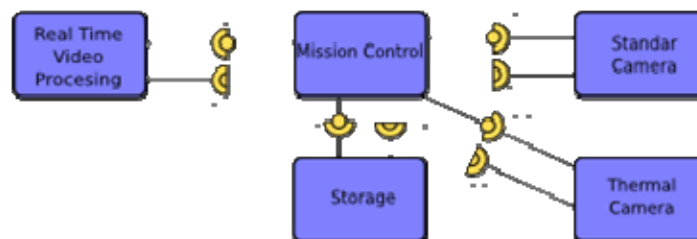


Fig 2.2.3 **Modelo de envío/recepción paquetes de activación de cámaras**

La misión se encarga de estipular las capturas de información que se han de ejecutar durante el proceso de vuelo sobre la zona marcada. Controlará las áreas sobre las que interesa esta recopilación fotográfica, sin embargo desconoce los puntos de control de las tomas fotogramétricas, teniendo como único recurso la posición de coordenadas del avión en el momento de la captura. Esto provocará posteriormente a la toma de información la necesidad de realizar procesos de georeferenciación de las imágenes para poder ubicarlas en el mapa.

2.3 Estación de seguimiento

Las estaciones de seguimiento sirven para tener un control exhaustivo del avión no tripulado desde tierra, tanto para el control de posicionamiento como para la captura o impulsión de la toma de información necesaria. Obtendrá capturas digitalizadas y comprimidas por las cámaras del UAV. Tendrá diversidad frecuencial para asegurar la disponibilidad de la telemetría. Las

imágenes son multiplexadas junto con los parámetros del vuelo, proporcionados por el sistema de adquisición de datos de a bordo.

Recoge una serie de información telemétrica para conocer paramétricamente el estado del avión en todo momento. Las estaciones se caracterizan por:

- ◆ **Plan de vuelo del UAV:** Representar el plan de vuelo sobre la cartografía correspondiente a la zona a cubrir, validación de la misión, definición de rutas y rutas auxiliares si es necesario.
- ◆ **Misión y control Payload:** Posible presentación en tiempo real del plan de vuelo y misión, en caso contrario aportación de información obtenida y Indicación de la posición del objeto.
- ◆ **Modo de control:** Waypoints, trayectorias predefinidas por donde el UAV va a volar, plan de retorno programado en caso de querer abortar la misión y una programada que ha de seguir el avión en caso de encontrarse en una situación de alarma.



Fig 2.3.1 Ejemplo Estación de seguimiento

CAPITULO 3. ANALISIS Y PLANIFICACION

Este capítulo se centra en analizar los puntos más relevantes para llevar a cabo la georeferenciación de información del UAV. Incluye los objetivos individuales del procesamiento de información aérea, el estudio del problema, planificación y costes del proyecto.

3.1 Análisis

Esta fase analiza y da a conocer información necesaria para afrontar el problema y así poder entender con mayor profundidad los pasos a seguir.

3.1.1 Imagen Digital

La imagen digital es la base de todo proceso digital. La resolución geométrica, radiométrica y espectral, y sus precisiones, dependen de las características del sensor y del tratamiento digital aplicado sobre las mismas.

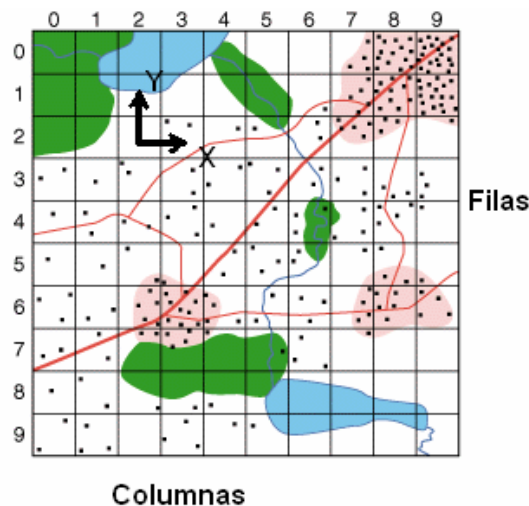


Fig 3.1.1.1 Imagen digital

Una imagen digital es una matriz bidimensional de niveles de grises, con elementos de información mínima, que varían en función de la posición (fila, columna) que adoptan dentro de la matriz [Fig 3.1.1.1]. Cada elemento se llama píxel y tiene tamaño finito. Al hablar de imágenes se habla de elementos de imagen o píxeles en vez de puntos de imagen. El valor numérico de cada casilla de la matriz se transfiere al píxel correspondiente que tenga las mismas coordenadas (x,y). Cada píxel recibe un tono de gris que se corresponde con el valor del píxel. Ahora, la matriz aparecerá en la pantalla como una imagen o un mapa temático.

En fotogrametría se trabaja con coordenadas imagen. La consecución de dichas coordenadas es inmediata siempre que hayan sido obtenidas mediante una calibración por medio de escáneres y cámaras.

Cuando se producen capturas de imágenes digitales mediante fotogramas se tienen que realizar una serie de pasos:

- ◆ Pasar coordenadas píxel (digitales) de las marcas fiduciales a coordenadas fiduciales calibradas.
- ◆ Pasar coordenadas fiduciales calibradas a coordenadas transformadas.
- ◆ Pasar de coordenadas transformadas a coordenadas imagen.

En fotografías digitales convencionales, las coordenadas fiduciales se sustituyen por las fotocoordenadas de las esquinas e intersecciones de los márgenes. Las coordenadas fiduciales dejan de existir y se reemplazan por las coordenadas de las esquinas de la propia imagen digital.

En fotogrametría aérea digital lo usual es obtener las imágenes digitales a través de procesos de digitalización, escaneando las imágenes mediante escáneres métrica de precisión.



Fig. 3.3.3.1 Imágenes digitales aéreas.

3.1.2 Georeferenciación

Para la disposición de las imágenes sobre el mapa se requiere de una precisión geométrica muy elevada. Las imágenes deben ser corregidas geoméricamente, mediante el proceso conocido como georeferenciación.

Si la imagen no se encuentra georeferenciada, ni corregida geográficamente es necesario adjudicarle algunos puntos de control, introducirle coordenadas de puntos fácilmente reconocibles como carreteras, construcciones o algún objeto que no tienda a ser dinámico. El nivel de precisión alcanzado en la georeferencia depende de la información geográfica utilizada (cartografía oficial, mapa...) y de la escala a la que se realice el trabajo.

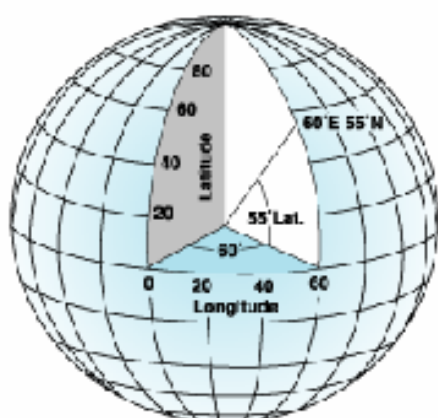
Los puntos de control de tierra se adquieren a partir de la digitalización de mapas o por mediciones en campo con GPS. La cantidad de puntos necesarios para una buena rectificación dependerá del orden (grado) del polinomio de las transformaciones a usar, del relieve del área y del grado de precisión requerido. Cuantos mas puntos se usen mejor y su distribución tiene que ser uniforme en toda la imagen.

Coordenadas geográficas

Para poder localizar elementos geográficos y características de la tierra, es necesario transformar esos puntos a una posición sobre el mapa plano. Esto requiere de una proyección de los elementos sobre el mapa de forma grafica.

Un sistema de coordenadas es un sistema de referencia usado para localizar elementos. Parámetros importantes a conocer para evitar errores en el manejo de la información son los siguientes:

- ◆ **Escala:** Relación matemática entre las dimensiones reales y el dibujo en un plano.
- ◆ **Proyección:** Figura que se obtiene al dirigir todas las líneas proyectantes de un objeto hasta un plano.
- ◆ **Dátum:** Representaciones que reflejan planos x, y, z para establecer las superficies críticas desde donde medir y controlar la altura, anchura y grosor de un cuerpo.
- ◆ **Transformación de coordenadas:** Conversión de coordenadas de unos sistemas a otros.



Latitud y longitud corresponde a la definición de la localización geográfica. La longitud varía de 0 a 180 grados en el hemisferio Este y de 0 a -180 grados en el hemisferio Oeste de acuerdo a los meridianos (líneas imaginarias). La latitud varía de 0 a -90 grados en el hemisferio sur de acuerdo con las líneas ecuatoriales.

Fig. 3.3.2.1 Latitud y longitud

La tierra se puede aproximar a una figura geométrica: elipsoide o esfera. El sistema de coordenadas geográficas no es único, diferentes métodos definen

elipsoides de la tierra de diferentes tamaños y con centros de origen no coincidentes. Consecuentemente a la dificultad de determinar el geocentro de forma única, provoca que para un mismo punto sobre la tierra, sus coordenadas geográficas no sean iguales para los distintos elipsoides.

El elipsoide WGS84, fue determinado de datos de satélite orbitales y es considerado el mas preciso. Los cartógrafos están rápidamente cambiando este elipsoide que logra obtener un único sistema de referencia en coordenadas para todo el mundo.

Identificar elementos en un mapa requiere conocer su latitud, longitud y a menudo altitud. La elaboración de mapas debe constar de una red de puntos geodésicos sobre la tierra que definan su precisión.

Proyección de un plano

Cuando se habla de proyección se habla de un plano bidimensional. Proyección significa realizar una deformación de la tierra, haciéndola plana y pasar de coordenadas esféricas (ángulos) a un sistema cartesiano (x,y).

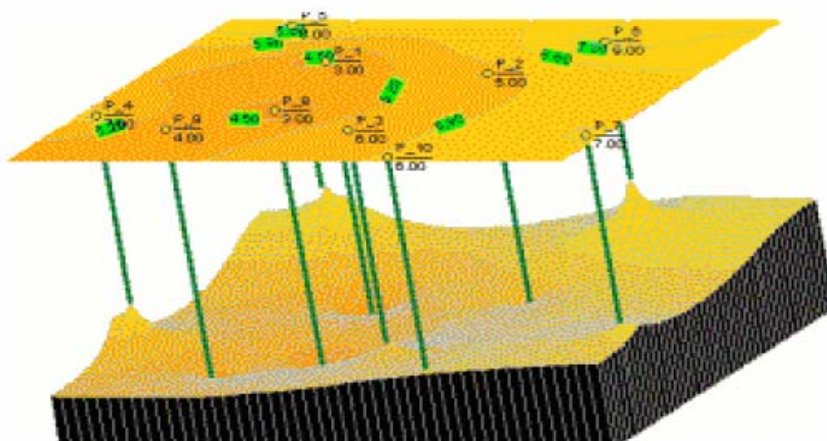


Fig. 3.3.3.1 Superficie y su proyección

Las fotos aéreas son planas pero la superficie de la tierra que representa es curva, además la tierra no es una esfera perfecta sino que esta achatada por los polos y ensanchada en el ecuador, por lo que la mejor aproximación de la tierra es un elipsoide. Para los distintos países, dependiendo de su ubicación en el planeta, existen elipsoides que definen las características para una mejor aproximación a la realidad.

Existen muchos sistemas de proyección y diversos factores influyen en su elección, comenzando por el objetivo de la construcción del mapa, el tipo de elementos a cartografiar, etc.

La proyección cartográfica viene afectada por la distorsión de manera que los datos sufrirán errores de alineación salvo que se trate de la misma proyección.

3.1.3 Correcciones geométricas

El concepto de corrección se refiere a cualquier cambio en la posición que ocupan los píxeles de la imagen. El cambio de estas posiciones son a causa de ubicar posicionalmente la imagen en un mapa o cartografía. Las transformaciones, al ser las imágenes digitales, pueden basarse en funciones numéricas, que permiten modificar la geometría de la imagen.

Las correcciones geométricas de fotografías aéreas fundamentalmente se basan en dar solución a la corrección cartográfica de la imagen para así superponer dos imágenes entre sí o sobre un mapa.

Las correcciones se realizan en tres fases que son: establecimiento de los puntos de control, cálculo de las funciones de transformación y transferencia de los ND (números digitales de la imagen) originales a la nueva posición.

Establecimientos de puntos de control

Consiste en la localización de puntos comunes a la imagen y el mapa. La disposición de estos puntos es necesaria para la utilización de las funciones que transforman las coordenadas de la imagen al mapa. Estas funciones serán una relación entre ambos documentos gracias a estos puntos.

La calidad del ajuste dependerá de la precisión con que se localicen los puntos de control. En definitiva, el establecimiento de los puntos resulta una fase crucial del proceso de corrección.

El número de puntos de control depende del tamaño y la geometría de la imagen. Matemáticamente solo son necesarios tres puntos para una función de ajuste de primer grado (orden del polinomio de la función), seis para segundo grado y diez para un tercer grado. Es aconsejable de cara a garantizar una buena adaptación entre imagen y mapa que el número de puntos supere el límite.

La localización de los puntos debe ser claramente identificable y carente de dinamismo para una buena superposición de informaciones. La localización interactiva de los puntos permite al usuario identificarlos visualmente. Los puntos de control también podrán ser calculados a partir de información de la posición de la toma de las imágenes.

Una función lineal aplica las transformaciones elementales de una imagen, como cambiar la escala y origen, inclinarla, modificar la relación entre sus ejes y rotarla.

Función de transformación

La corrección digital de la geometría de una imagen se realiza estableciendo una función matemática, que pone en relación las coordenadas de la imagen con las del mapa. De esta forma, a partir de la coordenada columna y línea de cada píxel, se puede estimar las coordenadas (x,y) de la imagen resultante.

Existen varios tipos de transformaciones dependiendo del grado de precisión que se requiera. Las transformaciones que más se ajustan al objetivo buscado por SKY-EYE son la transformación Afín [Anexo D.1] y la proyectiva bidimensional.

Transformación Proyectiva bidimensional:

Esta transformación es la más acorde a las necesidades del proyecto, ya que utiliza triangulaciones aéreas para el cálculo de coordenadas espaciales.

Las ecuaciones de la transformación bidimensional proyectiva posibilitan el cálculo analítico de coordenadas de puntos del sistema de referencia sobre un plano (X, Y) a partir de las coordenadas de sus puntos homólogos en el sistema arbitrario (x', y') , pertenecientes a otro plano inclinado (fotograma, imagen digital).

Los sistemas de coordenadas utilizados son:

- ◆ (X, Y, Z) sistema de referencia (sistema terreno).
- ◆ (x', y', z') sistema arbitrario (sistema imagen), con ejes inclinados respecto al sistema de referencia (fotograma, imagen digital) .
- ◆ $(\bar{x}', \bar{y}', \bar{z}')$ sistema arbitrario (sistema imagen ideal), con ejes paralelos al sistema de referencia.

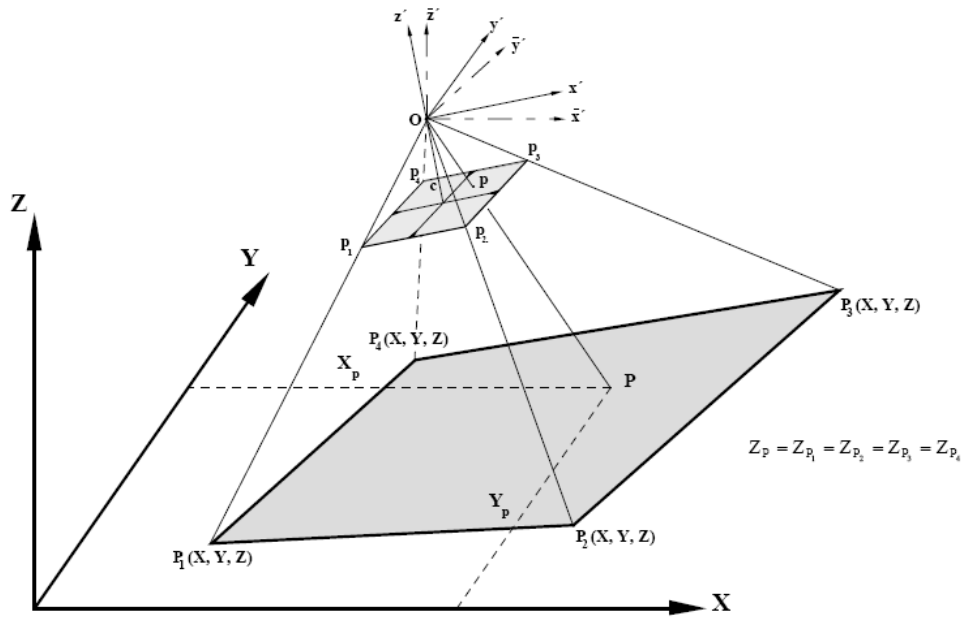


Fig. 3.2.2.3 Reconstrucción toma fotográfica

Si al sistema de coordenadas imagen (sistema ideal) $(\bar{x}', \bar{y}', \bar{z}')$ se le aplican tres rotaciones $(\omega, \varphi, \kappa)$, el sistema pasará a ser el sistema arbitrario (sistema imagen) (x', y', z') , Fig 3.2.2.2.

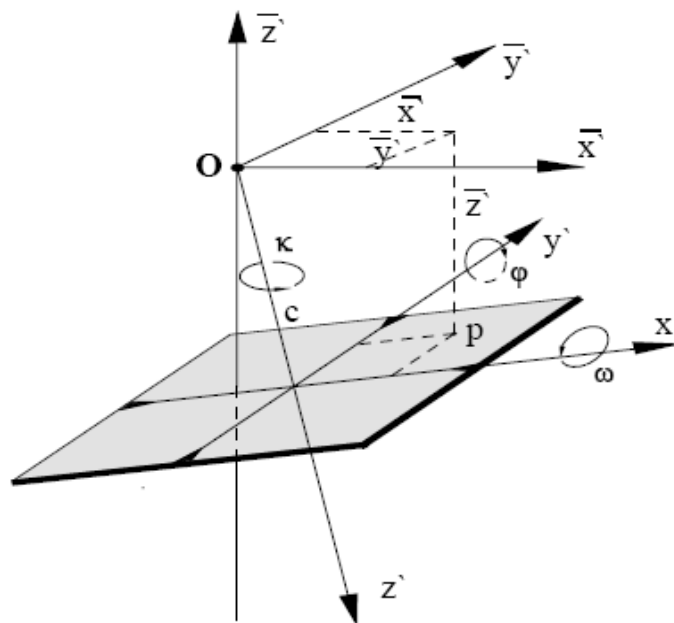


Fig. 3.1.3.3 Sistema de coordenadas sobre la imagen

Aplicando transformaciones por rotación, el plano imagen será:

$$\begin{aligned}x &= a_{11}x' + a_{12}y' + a_{13}c \\y &= a_{21}x' + a_{22}y' + a_{23}c \\z &= a_{31}x' + a_{32}y' + a_{33}c\end{aligned}$$

Los parámetros angulares mediante el estudio de triangulación quedan:

$$\begin{aligned}a_{11} &= \cos \varphi \cos k \\a_{12} &= -\cos \varphi \operatorname{sen} k \\a_{13} &= \operatorname{sen} \varphi \\a_{21} &= \cos(w) \operatorname{sen}(k) + \operatorname{sen}(w) \cos(k) \\a_{22} &= \cos(w) \cos(k) - \operatorname{sen}(w) \operatorname{sen} \varphi \operatorname{sen}(k) \\a_{23} &= -\operatorname{sen}(w) \cos \varphi \\a_{31} &= \operatorname{sen}(w) \operatorname{sen}(k) - \cos(w) \operatorname{sen} \varphi \cos(k) \\a_{32} &= \operatorname{sen}(w) \cos(k) + \cos(w) \operatorname{sen} \varphi \operatorname{sen}(k) \\a_{33} &= \cos(w) \cos \varphi\end{aligned}$$

Puesto que la proyección de la imagen sobre el sistema de referencia sufre transformaciones de escala y translación, las ecuaciones quedan:

$$\begin{aligned}X &= X_0 + \lambda(a_{11}x' + a_{12}y' + a_{13}c) \\Y &= Y_0 + \lambda(a_{21}x' + a_{22}y' + a_{23}c) \\Z &= Z_0 + \lambda(a_{31}x' + a_{32}y' + a_{33}c)\end{aligned}$$

Se supone que los puntos del sistema terrenal se encuentran a una misma Z , imaginando que el terreno no tiene elevaciones. Dividiendo las dos primeras ecuaciones por la tercera y despejando $a_{33}c$ del denominador, quedan como ecuaciones generales:

$$\begin{aligned}X &= X_0 + (Z - Z_0) \frac{(a_{11}x' + a_{12}y' + a_{13}c)}{a_{33}c \left(\frac{a_{13}}{a_{33}c} x' + \frac{a_{32}}{a_{33}c} y' + 1 \right)} \\Y &= Y_0 + (Z - Z_0) \frac{(a_{21}x' + a_{22}y' + a_{23}c)}{a_{33}c \left(\frac{a_{31}}{a_{33}c} x' + \frac{a_{32}}{a_{33}c} y' + 1 \right)}\end{aligned}$$

Conocidas las coordenadas de un número de puntos $n \geq 4$ en ambos sistemas, pueden calcularse los ocho parámetros de transformación.

Una vez calculados los parámetros se podrá obtener las coordenadas sobre el sistema de referencia de los puntos correspondientes que se midan sobre el sistema fotográfico. Proceso conocido como "Rectificación analítica o numérica".

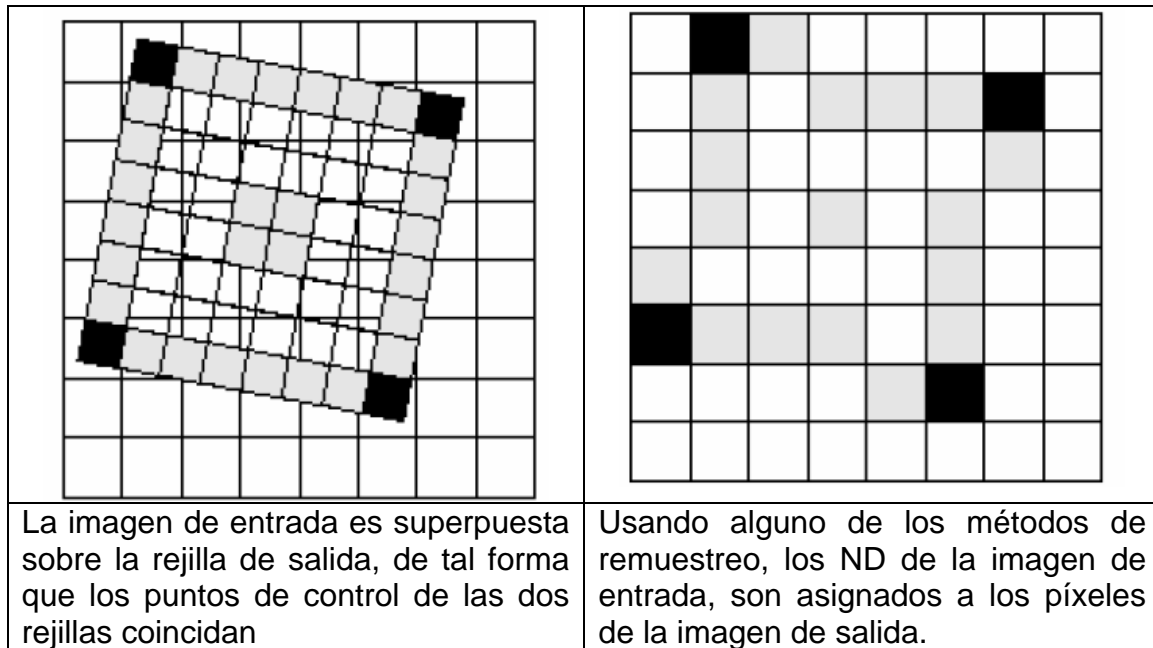


Fig. 3.1.3.4 **Asignación de píxeles.**

Transferencia de los ND originales a la posición corregida.

Las funciones analizadas anteriormente permiten traducir las coordenadas del mapa a la imagen. Ahora bien, si pretende crearse una imagen que se corresponda adecuadamente con esas coordenadas, resulta necesario trasvasar, de alguna forma, los ND de la imagen original a esa nueva posición.

Cada píxel de la imagen corregida deberá corresponderse a un solo píxel en la original. Lo normal es que el píxel de la nueva imagen se sitúe entre varios de la original, ya que este proceso supone una alteración de la geometría original de la escena.

3.2 Objetivos

Para poder analizar el comportamiento de incendios existentes, una buena opción es disponer de fotografías aéreas sobre la zona en la que se encuentre. Esta información es recopilada por el avión encargado de sobrevolar el territorio mediante un plan de vuelo y misión predispuestos a la ejecución.

La información recopilada corresponde a imágenes con formato .jpg, tomadas con una cámara aérea, las cuales carecen de ningún tipo de información geográfica y cuyas características como la resolución vendrán determinadas por los parámetros de la cámara fotográfica.

El objetivo principal es poder localizar y proyectar de manera satisfactoria las imágenes capturadas, imágenes que serán proyectadas sobre el mapa cartográfico que represente el plan de vuelo y misión realizada por el UAV.

Los objetivos a conseguir son:

- ◆ Localizar el punto central de la imagen en su espacio terrenal. Es decir, se necesita 1 punto de control de coordenadas específicas en el sistema de espacial correspondiente a la zona de vuelo. Este punto será encontrado mediante una serie de transformaciones angulares a partir de las coordenadas de latitud y longitud correspondientes al avión en el momento de la toma fotográfica y parámetros de la cámara. Es la proyección del origen de coordenadas de la posición de avión en el momento de la toma.
- ◆ Cálculo del área de proyección de la imagen sobre el mapa. Esta área sufrirá una serie de transformaciones a causa de cambios de escala, rotaciones y traslaciones por motivos de proyección de la imagen ideal tomada desde el aire. Se pretende visualizar el área proyectada sobre el mapa cartográfico de cada una de las fotos que interesen.
- ◆ Se pretende georeferenciar la imagen. Sufrirá una serie de transformaciones, principalmente se llevara a cabo un cambio de sistema de coordenadas, cambios en la escala, rotaciones y traslaciones para poder ser proyectada correctamente sobre la cartografía a la cual corresponda. Se pretende georeferenciar mediante transformaciones polinómicas utilizando las herramientas de ESRI, para ello se calcularán los puntos de control entre el plano imagen y el plano terrenal
- ◆ Finalmente se pretende crear un ortofoto. Imagen que dispone de información geográfica gracias a que va acompañada de un fichero de texto denominado "WorldFile", relleno de una serie de parámetros de transformación necesarios para su correcta visualización.

En resumen, se localizaran el/los punto/os de control de la imágenes en el plano ideal y real, área abarcada por las fotografía y la proyección de la mismas sobre un mapa cartográfico.

3.3 Planificación

Para llevar a cabo los objetivos marcados se realizan una serie de etapas analíticas y de desarrollo entrelazadas. Son fases que pueden generarse de manera independiente sin embargo se encuentran muy relacionadas para conseguir el objetivo global marcado. Las etapas estimadas se recogen en la figura 3.3.1.

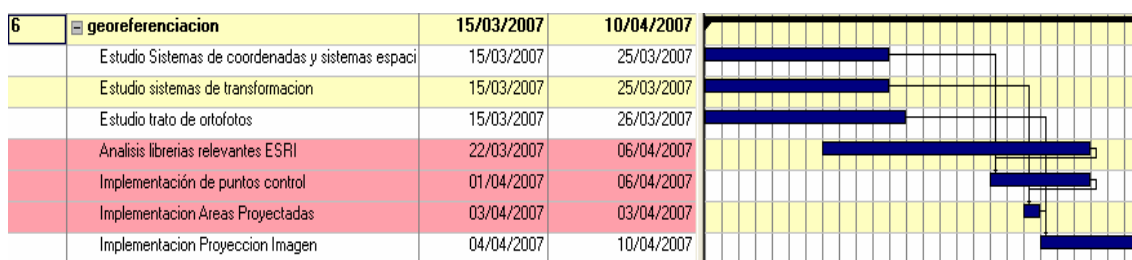


Fig. 3.3.1 Planificación inicial de Georeferenciación

Las cuatro primeras fases son de carácter analítico. Estas fases son importantes para poder llevar a cabo las tres últimas ya que requieren de la adquisición de su conocimiento. Los cometidos de cada fase son:

- ◆ Estudio de sistemas de coordenadas y sistemas espaciales: Esta fase se encarga del análisis de sistemas de coordenadas. Estudio de las diferentes maneras de representar ubicaciones de elementos. Analizar coordenadas espaciales (grados), coordenadas imagen y coordenadas mapa.
- ◆ Estudio Sistemas de Transformación: Etapa encargada del análisis de metodologías de transformación de coordenadas por motivos de proyección espacial.
- ◆ Estudio trato de ortofotos: Fase de análisis de formatos de imágenes georeferenciadas y sus características. Estudio encargado de editar sus parámetros y correcta georeferenciación.
- ◆ Análisis librerías ESRI: Esta fase es la más importante del proyecto. Se encarga de analizar las librerías y funcionalidades disponibles por ESRI para facilitar y llevar a cabo la georeferenciación de imágenes.
- ◆ Implementación de puntos de control: Desarrollo del código necesario para proyectar los puntos de coordenadas origen de las fotos en el aire. Estos puntos serán observados en las cartografías del plan de vuelo.
- ◆ Implementación de Áreas Proyectadas: Fase en la que se calcularán las áreas proyectadas de la imagen sobre el mapa. Estas áreas serán visualizadas y corresponderán a la ubicación de la imagen en el mapa.
- ◆ Implementación proyección imagen: Esta etapa se encargara de proyectar la imagen ya georeferenciada en la ubicación correspondiente sobre el mapa.

Al igual que en la planificación inicial la duración de las fases es una estimación, la durabilidad dependerá del grado de dificultad encontrado. La dedicación seguirá siendo de 5h diarias a la semana.

3.4 Costes Individuales

En los costes individuales se ha de tener en cuenta el trabajo de tres desarrolladores, aunque es una etapa realizada solo por una persona. Los tres integrantes corresponden al analista, programador y documentado. Cada uno de ellos realizara una función diferente y por tanto su jornada laboral difiere en el saldo.

La tabla siguiente recoge el cálculo de los costes provocados por el personal encargado de la georeferenciación.

Tabla 3.4.1 Costes personal

Desarrolladores	Implicados	Horas	€/Hora	Coste Total
Analistas	1	130	32	4160 €
Programadores	1	235	25	5875 €
Documentadores	1	80	20	1600 €
Coste total [Euros]				7891 €

Respecto al coste por material necesario para afrontar el proyecto se corresponde al mismo que en la tabla 1.6.2.1, con la diferencia de utilizar solo 1 puesto de trabajo, por tanto el resultado final por costes de oficina es 9.159€.

Finalmente el presupuesto total para el procesado de información aérea corresponde a un total de 17.050€, teniendo en cuenta costes por material y personal.

CAPITULO 4. ESPECIFICACION Y DISEÑO

4.1 ESRI Arcgis Runtime DevelopmentKit

ArcGis Engine es una herramienta para desarrolladores que proporciona un gran abanico de metodologías, objetos, librerías etc, que facilitan la labor de desarrollo y proporcionan fiabilidad en cuanto a código optimo se refiere.

Es un sistema que puede ser ejecutado en distintos sistemas operativos como Windows, Linux o Solaris. Proporciona cuatro APIs de desarrollo de manera que esto facilita los entornos de desarrollo. Estas posibles APIs, entornos de desarrollo y lenguajes para *ArcGis Engine* corresponde a *COM-Visual Studio 6.0 (VB6,VC++)*, *.NET-Visual Studio .NET (VB.NET,C#)*, *Java-Eclipse*, *Websphere Studio,Intelli J, JBuilder* y *C++-Visual Studio 6.0, C++ Builder*.

Está formado por componentes *ArcObject* (componentes que forman *ArcGis*) además de incluir controles de desarrollo.

Proporciona ayudas adicionales en forma de documentos y recursos Web. Tiene una serie de licencias de desarrollo para poder utilizar las herramientas que proporciona.

Mediante el uso de esta herramienta acoplada a Visual Studio 2005, se llevará a cabo la implementación de georeferenciación de imágenes aéreas, haciendo uso de algunas de sus librerías, controles y métodos que proporciona.

4.1.1 Arquitectura de Software

La arquitectura de software soporta numerosos productos, cada uno con requerimientos únicos. Los componentes que hacen *ArcGis* y *ArcObjects* son designados y construidos para soportar esta plataforma.

ArcObjects es una plataforma independiente de componentes de software, escritos en C++, que proporcionan soporte a aplicaciones GIS de escritorio. Hacen uso de *Microsoft Component Object Model (COM)*. Éste proporciona una infraestructura sólida de diferentes niveles de operación que soporta varias construcciones de sistemas COM.

No todos los *ArcObject* son creados igual, los requerimientos de cada uno son particulares, con funcionalidades básicas dependiendo de su finalidad. Las tres grandes familias de productos de *ArcGis* son:

- ◆ **ArcGis Engine:** Objetos que dan soporte a una variedad de usos, simple *map dialog boxes*, *multithreaded Server* y complejas aplicaciones Windows de escritorio. Algunas dependencias podrían introducir complejidad en la instalación de la aplicación construida en el *ArcGis Engine* [Fig 4.1.1].

- ◆ **ArcGIS Server:** Objeto usado dentro de *Server framework*, donde clientes de los objetos son a menudo remotos. Los clientes pueden trabajar en local, con la posibilidad de estar en la misma máquina o red, a distancia, donde clientes pueden estar dentro de la red [Fig 4.1.1].
- ◆ **ArcGIS Desktop:** En aplicaciones ArcGIS se trabaja con objetos. Estas aplicaciones contienen multitud de *dialog boxes* y propiedades que hacen que el usuario trabaje eficientemente con la funcionalidad de los objetos [Fig 4.1.1].

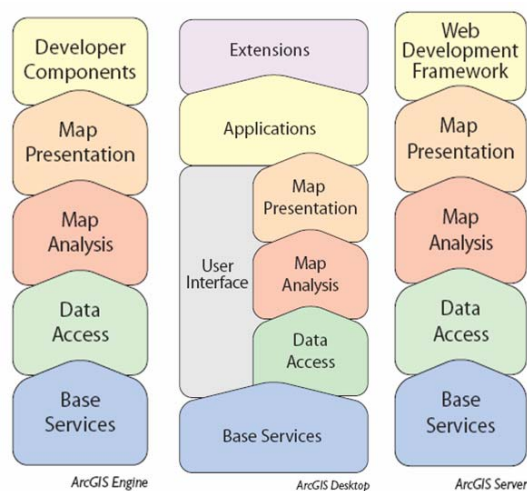


Fig. 4.1.1 Familias de productos ArcGIS

La arquitectura de *ArcGIS* proporciona una rica funcionalidad al desarrollo, pero no es un sistema cerrado. La arquitectura es extensible para desarrolladores externos a ESRI. La aparición de nuevos métodos y propiedades, hacen que surjan nuevas versiones de la arquitectura más enriquecidas en funcionalidad.

El principal foco de cambios hacia la arquitectura *ArcGIS 9.0* se basa en cuatro conceptos:

- ◆ **Modularidad:** Sistema modular donde las dependencias entre componentes son bien definidas en un sistema flexible.
- ◆ **Escalabilidad:** *ArcObject* puede llevar a cabo satisfactoriamente en todo los entornos operativos, desde una simple aplicaron de escritorio a una aplicación Server multiusuario.
- ◆ **Soporte Multiplataforma:** *ArcObject* para *Engine* y *Server* deberían ser capaces de cunear en múltiples plataformas.
- ◆ **Compatibilidad:** *ArcObjects 9.0* debería seguir siendo equivalente tanto funcional como programablemente a *ArcObject 8.3*.

4.1.2 Librerías

ArcGis Engine proporciona un gran número de librerías, sin embargo no todas requieren de su uso de cara al proyecto SKY-EYE. En este apartado se hace referencia a aquellas más acordes a las necesidades del proyecto y las cuales han sido utilizadas para resolver los objetivos. El resto de librerías aportadas por ESRI se presentan en el anexo B.1.

Las librerías de *ArcGis* relacionadas con la georeferenciación de una imagen son las siguientes:

- ◆ **System:** Es la librería de más bajo nivel en la arquitectura de *ArcGIS*. Contiene componentes utilizadas por otras librerías. El desarrollador no puede extender esta librería pero puede extender el *System ArcGIS* implementando interfaz que contengan esta librería.
- ◆ **SystemUI:** Contiene las definiciones de interfaz para componentes de UI (interfaz de usuario). Los objetos contenidos dentro de esta librería son objetos para uso general disponibles para que el programador pueda simplificar algunos procesos de interfaz de usuario.
- ◆ **Geometry:** Esta librería se encarga de la geometría, las formas, o las características almacenadas en clases de elementos gráficos. Los objetos geométricos principales, con los que más se programará serán el punto, múltiples puntos, *Polyline*, y polígono.
- ◆ **Display:** Contiene los objetos utilizados para enseñar de los datos GIS. Además de los objetos principales para dar salida a la imagen, la biblioteca contiene objetos que representan símbolos y colores utilizados para controlar las características de las entidades dibujadas.
- ◆ **DataSourcesRaster:** Contiene la implementación de la *GeoDatabase* API para los archivos *Raster*.
- ◆ **Geodatabase:** Contiene una API para bases de datos con información geográfica. Los objetos dentro de esta librería proporcionan un modelo de programación unificado para todas las fuentes de datos *ArcGIS*. El *geodatabase* se puede ampliar por el programador para trabajar con tipos de datos específicos que no lea *Geodatabase*.
- ◆ **DataSourceFile:** Contiene la implementación de la *GeoDatabase* API para los archivos basados en fuentes de datos. Estas fuentes de datos incluyen *shapefile*, cobertura, TIN, CAD, SDC, y VPF. La biblioteca de *DataSourcesFile* no puede ser extendida por programadores.
- ◆ **Carto:** Soporta la creación y visualización de mapas. Estos mapas pueden consistir de información en un solo mapa, o una página con muchos mapas. Aquí podemos encontrar el *PageLayout*, un contenedor de mapas, y herramientas o el objeto Mapa, un contenedor de Capas. Cabe comentar

que no todas las capas son iguales, hay muchos tipos de ellas. Aunque los programadores pueden hacer uso directamente los objetos *Map* o *PageLayout*, es más conveniente que utilicen un objeto de más alto nivel, tal como el *MapControl*, el *PageLayoutControl*, o aplicaciones *ArcGIS*. Estos objetos de alto nivel simplifican algunas tareas, y proporcionan siempre el acceso a los objetos de nivel inferior como el *Map* o el *PageLayout*, permitiendo el control de todos los objetos.

- ◆ **Geoprocessing:** Librería que pone en ejecución el marco de geoprocesamiento además de las herramientas para este cometido. Las herramientas disponibles dependen de las licencias de las que se dispongan.
- ◆ **SpatialAnalyst:** Contiene los objetos para el análisis espacial de ejecución de datos raster y vector. Se requiere una licencia espacial de análisis para trabajar con los objetos en esta biblioteca.

4.1.3 Subsistemas de Librerías

Una imagen desde el puntos de vista de desarrollo utilizando *ArcGis*, se identifica como un objeto *raster*, el cual esta formado por una serie de datos (píxeles, escala...) con valores distintos dependiendo de la imagen.

Para tratar las fotografías existe la librería “*DataSourcesRaster*” que contiene una serie de clases, categorizadas por el acceso a los datos, por las transformaciones y por la carga de datos.

Un *raster DataSet* consiste en un *array* de espacios de celdas iguales que representan una temática espectral de una imagen. Un dato *raster* representa todas las cualidades de la superficie tierra, como elevación o vegetación, escaneo de imágenes y fotografías etc.

ArcGis soporta ficheros de datos *raster* como GRID, TIFF, ERDAS IMAGINA y JPEG.

Raster DataSet representa uno o múltiples *arrays* de píxeles con informaciones asociadas almacenados en un formato *raster*, como un fichero *system* o *geodatabase*.

Como tipo *geodataset*, *raster DataSet* puede contener información geográfica y un sistema de referencia espacial (*Spatial Reference*). La transformación geográfica define como los píxeles serán transformados durante el acceso y el sistema espacial define las coordenadas de los píxeles que son mapeados.

Workspace:

Un “*Workspace*” es un repositorio que almacena *geodatasets*. Par un *Rasterdata*, un *workspace* puede ser un directorio para ficheros de datos *raster*.

Para acceder a datos *Raster*, primero se crea un *Workspace* que puede ser iniciado mediante la clase *RasterWorkspaceFactory* que representa un *raster workspace*, luego se usa un interfaz *IRasterWorkspace2* usada para abrir y crear un *RasterDataSet* únicamente.

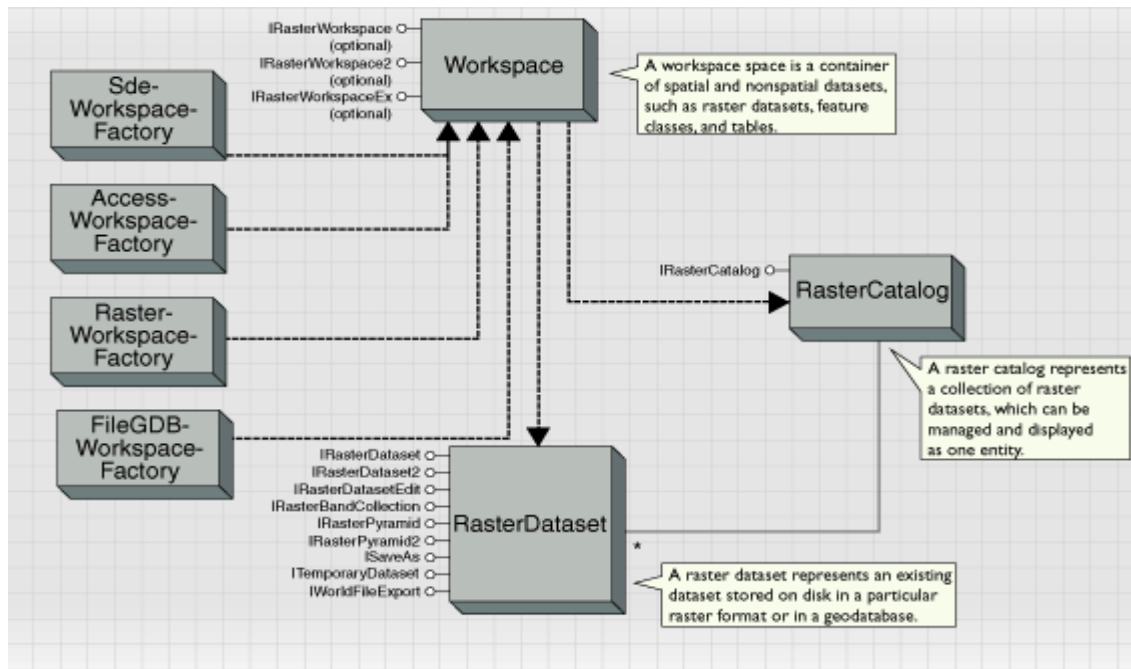


Fig 4.1.3.1 Objetos de acceso a datos Raster

Raster DataSet:

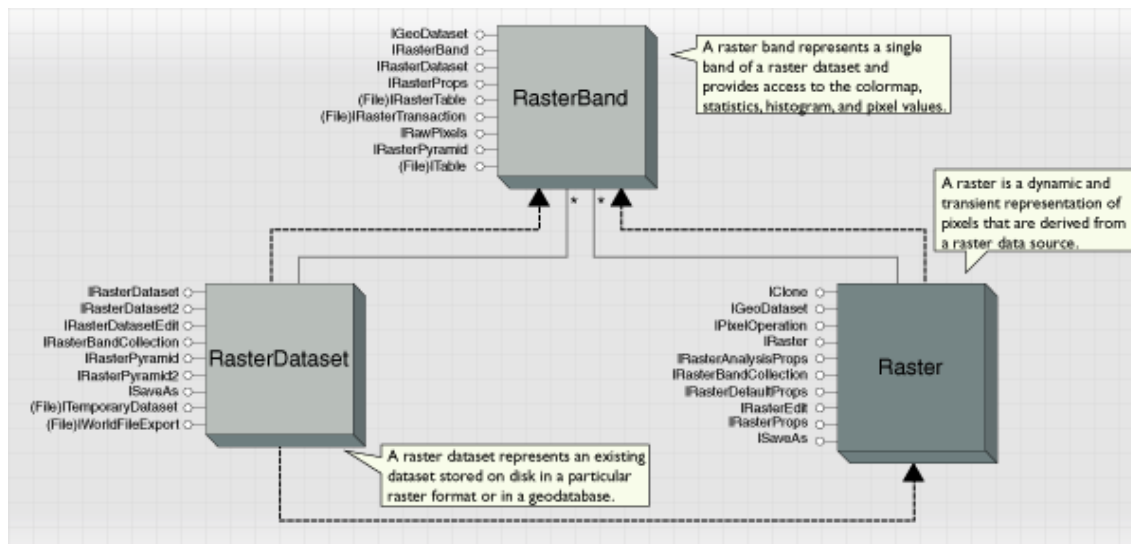


Fig 4.1.3.2 Objetos RasterDataset, Raster

RasterBand lo forman un grupos o grupos de *RasterDataset* y *Raster*.

RasterDataset es un fichero *RasterDataset*, que puede ser abierto por un sistema de ficheros o puede ser una base de datos *RasterDataset* abierta por

un fichero de base de datos, donde los píxeles son almacenados en memoria. Lleva a cabo funciones básicas como copiar, renombrar y borrar. Se utiliza la interfaz *IRasterDataset* para comprimir.

Un *RasterDataset* es un tipo de *Geodataset* y soporta interfaces como *IGeodataset*. Tiene un *extent* (área, cuadrado que ocupa la imagen), un sistema espacial y una transformación *geodata* (*GeodataXform*). La transformación *geodata* es almacenada como metadatos y es usada para transformar los píxeles al actual *extent* y sistema espacial.

La interfaz *IGeoDataSetSchemaEdit2* sirve para alterar el sistema espacial del *GeodataXform* del *RasterDataset*.

IRasterDataSet2 se usa para construir, cargar y borrar tablas en un *RasterDataset*.

ISaveAs se utiliza para llevar a cabo una conversión. Los formatos soportados por ESRI son GRID, TIFF, Imagine, JPEG, PNG, BMP, GIF, PCI...

Raster:

Un *Raster* al contrario que *RasterDataset* puede ser modificado sin datos de entrada. Se puede introducir una transformación, una proyección específica, un *extent*, y otras propiedades sin provocar cambios en el *RasterDataset*. Si se pretende mantener los cambios realizados, se ha de guardar otro *raster* nuevo utilizando *ISaveAs*.

Un *Raster* puede ser obtenido mediante una *RasterLayer*, una clase de la librería de *esriCarto*.

IRasterProps es una interfaz importante que se usa para introducir y obtener propiedades del *Raster*, como el *extent*, altura, anchura, sistema espacial de referencia, tipo de píxel, etc.

Puede ser dispuesto en pantalla usando una clase *RasterLayer* y varios objetos de la librería *Carto*.

Geodata Transformation:

Son operaciones matemáticas que se pueden usar para realizar transformaciones geométricas para *geodatasets* como un *RasterDataset*. *ArcGis* soporta varios tipos de transformaciones de datos incluyendo transformaciones de coordenadas, poli nómicas etc. Geodata transformación se representa en clases abstractas como *GeodataXform*, *AdjustXform*, etc.

Todos los *GeodataXforms* pueden tener un sistema espacial de salida que define el sistema espacial de referencia de los datos después de ser transformados

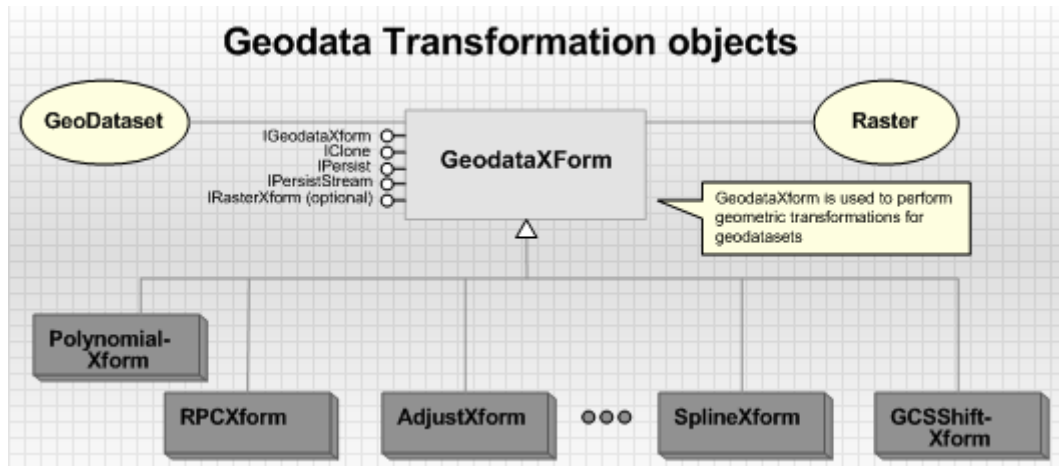


Fig 4.1.4.3 Objetos Geodata Transformation

RasterGeometryProc:

Esta clase se usa para realizar transformaciones polinómicas como voltear. Puede también proyectar *rasters* definidos con un sistema espacial hacia otro diferente. *RasterGeometryProc* se construye en base a una clase *PolynomialXform*.

Únicamente manipula clases *Rasters*, no *rasterBand* ni *RasterDataset*. Para mantener la transformación ejecutada se deben utilizar los métodos *Register* o *Rectify*, con funcionalidades parecidas a "save as".

4.2 Ortoimágenes

Una ortoimagen (ortofoto digital) es una imagen transformada que muestra en proyección ortogonal la escena fotografiada. La transformación de una imagen fotográfica a una ortoimagen se denomina rectificación diferencial que corresponde al cambio de una proyección perspectiva a una ortogonal.

Su aparición y desarrollo proviene de la incesante demanda hacia herramientas GIS debido a que disponen de información georeferenciada

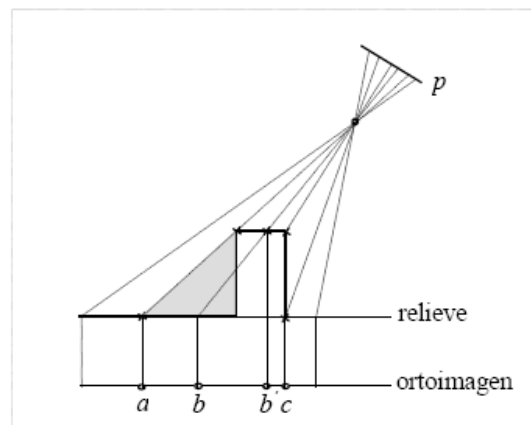


Fig 4.2.1 Geometría básica en la generación de una ortoimagen.

La algorítmica para la construcción de una ortoimagen estándar puede ser descrita de manera muy simple [Fig 4.2.1]: a cada punto del plano de la ortoimagen se le hace corresponder el punto del plano de la imagen original que le corresponde según un modelo geométrico apropiado para el sensor.

Los modelos más habituales de la ortoimágenes corresponden al MDT (modelo digital del terreno), que es un modelo de elevación (DEM “Digital elevation model”), que describe la superficie del terreno. Los MTDs son conjuntos de datos que extrapolan la coordenada Z a partir de las coordenadas planimétricas XY , $Z=f(X,Y)$.

Una ortoimagen es geoméricamente equivalente a un plano/mapa. Permite medir ángulos, distancias y áreas a pesar de que la información no está inicialmente discretizada. Por cada punto XY sólo existe una Z.

En primer lugar, los MDT normalmente utilizados derivan de la cartografía existente, que representa el terreno a nivel del suelo sin reflejar las estructuras existentes sobre el mismo (árboles, edificios). En segundo lugar, los edificios producirán normalmente zonas ocultas, es decir, áreas que deberían estar presentes en una proyección ortogonal del terreno, pero que se encuentran tapados por un edificio en la fotografía a corregir.

4.2.1 WorldFile para RasterDataset

Reiterando a lo que dicho anteriormente, las ortofotos son tratadas como datos *raster* los cuales en cada celda tienen un número de fila y columna. Para poder visualizar esta imágenes es necesario establecer un transformación de imagen a mundo que convierte las coordenadas imagen a coordenadas reales. Esta transformación típicamente es almacenada con la imagen.

Formatos como ERDAS, IMAGINE, BQS, BIP, GeoTIFF y Grids, reservan la información georeferenciada en el encabezado del fichero de la imagen. Esta información puede ir con la imagen o directamente separada en un ASCII World file, el cual contiene las transformaciones usadas por la imagen.

Formatos World File:

Los ficheros World files que acompañan a la imagen están nombrados de la misma manera, añadiendo al final la letra w. Ejemplos de nombre World files:

Tabla 4.2.1.1. Formatos Ficheros World file

Raster Data file	World files
Image.tif	Image.tfw, or imege.tifw
Image.bil	Image.blw or image.bilw
Image.jpg	Image.jgw or image.jpgw
Image.raster	Image.rasterw
Image	imagew

Contenido del World file:

Se accede a la transformación imagen-mundo cada vez que se visualiza la imagen, por ejemplo al hacer pan o zoom. La transformación es calculada por una serie de parámetros listados en el fichero, cuya posición va en función del grado de prioridad que representen.

El contenido del World file es similar al siguiente:

20.17541308822119	-A
0.0000000000000000	-D
0.0000000000000000	-B
-20.1754130882211	-E
424178.1147260128	-C
4313415.907263996	-F

La transformación de imagen a mundo es una transformación Afín [Anexo C.1] de seis parámetros dispuestos de la forma:

$$x_l = Ax + By + C$$

$$y_l = Dx + Ey + F$$

Donde

x_l = Coordenada X del píxel en el mapa.

y_l = Coordenada Y del píxel en el mapa.

x = Numero de columnas de la imagen.

y = Numero de filas de la imagen.

A = Escala "x", dimensión en unidades de mapa del píxel en el eje x.

B, D = Términos de rotación.

C, F = Términos de translación; x, y coordenadas del centro del píxel de la esquina superior izquierda.

E = Escala "y" negativa; dimensión en unidades de mapa del píxel en el eje y.

4.3 Estructura de la aplicación

La estación de seguimiento consta de una estructura con tres motores principales que son los diseñados por los tres TFCs. Esta aplicación sigue la estructura dispuesta en la figura 4.3.1.

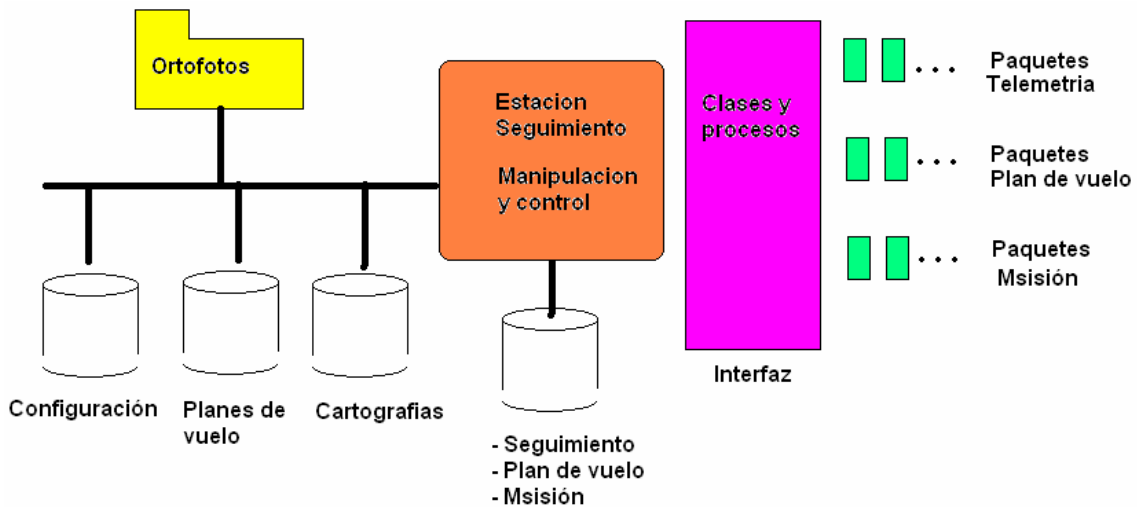


Fig 4.3.1 Estructura de la estación de seguimiento

Existen tres flujos de información mediante paquetes. Los paquetes de telemetría y plan de vuelo son procesados por la gestión de plan de vuelo. Esta a su vez controla las bases de datos cartográficas y de plan de vuelo.

Los paquetes de misión pertenecen a la parte de procesado de la información que junto al almacenaje de ortofotos constituye el modelo de visualización de la información por pantalla.

Tanto la gestión del plan de vuelo con la de procesado de información desarrollan el modelo de clases utilizado por la aplicación.

El control de la estación de seguimiento junto a la base de datos de configuración en cuestión de visualización por pantalla es tarea del diseño GUI de la estación de seguimiento.

El procesado de información lleva consigo una implementación de recepción de paquetes de misión y una serie de algoritmos de transformación para poder ser visualizada por pantalla.

4.3.1 Modelo de capas

El modelo está constituido por tres capas, de las cuales este proyecto está relacionado con la intermedia, con el fin de procesar fotografías aéreas proporcionadas por la misión que ejecuta el avión [Fig 4.3.1.1].

Las otras dos capas se encargan de la estructuración de clases y el diseño de pantallas respectivamente, siendo la de más bajo nivel la encargada de la gestión de información telemétrica y de plan de vuelo.

La última capa corresponde a la visualización GUI de los procesos ejecutados internamente por las capas inferiores.

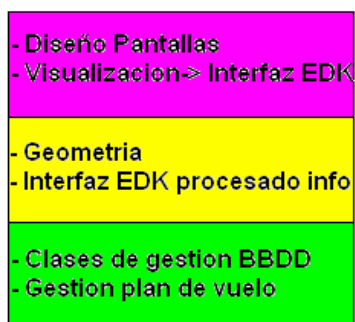


Fig 4.3.1.1 Modelo de capas

4.4 Diagramas de clases

Los diagramas de clases representan el diseño conceptual de la información que se maneja en el sistema, aporta los componentes encargados del funcionamiento y la relación entre ellos.

En los diagramas de clase se encuentran agrupados métodos, propiedades y atributos necesarios para el desarrollo de los objetivos establecidos. El conjunto de clases se introduce dentro de la aplicación como una librería. dll. La librería para la implementación del procesado de la información se denomina processed mision.dll, Las clases que la forman son:

- ◆ **NewOrtho:** Corresponde a la clase principal para el proceso de georeferenciación. Contiene toda la información necesaria para poder georeferenciar y los métodos más importantes para la transformación de imágenes. Esta clase además de los atributos iniciales dispondrá de aquellos que resultan del procesado de la información recibida por los paquetes de misión.
- ◆ **Paquetes Misión:** En ella se encuentra la metodología de lectura de paquetes XML de misión y su almacenamiento.
- ◆ **Puntos_De_Control:** Clase que contiene un conjunto de métodos para encontrar los puntos de proyección de la imagen sobre el terreno.
- ◆ **CaracteristicasImagenProyectada:** En ella se encuentran los métodos para el cálculo de áreas proyectada sin rotación y el cálculo de los factores de escala de las celdas (píxeles) de la imagen.
- ◆ **Proyecciones_dePuntos:** Clase que recoge metodologías de visualización de los puntos sobre el mapa.
- ◆ **Paralelogramo:** Clase que aporta la información sobre el área proyectada y debidamente rotada.

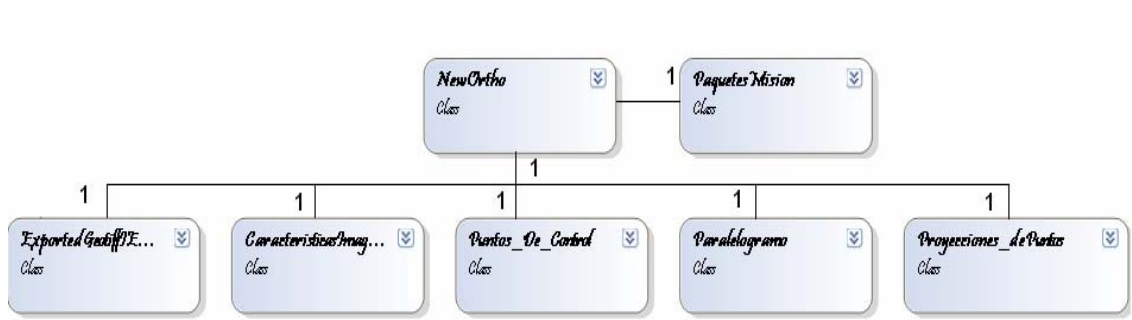


Fig 4.4.1 Diagrama de clases

CAPITULO 5. IMPLEMENTACION, PRUEBAS E INTEGRACION

Esta etapa se encarga de la traducción en código de todo el material recopilado en las fases anteriores. En primer lugar se analizará en detalle las metodologías utilizadas para implementar en código la solución a los objetivos buscados. Posteriormente se evaluará la solución y se expondrán los ejemplos más destacados. Finalmente se hará constar de los procesos seguidos para integrar los 3 TFCs.

5.1 Implementación

La implementación del procesado de información aérea se ha realizado mediante Visual Studio 2005 integrado con la API de ESRI Engine.

Esta etapa se subdivide en varias fases relacionadas entre si, que con su correcto funcionamiento darán el resultado de georeferenciación y rectificación de imágenes.

Finalmente las imágenes georeferenciadas pasaran a denominarse ortofotos, que contendrán ficheros con información sobre los parámetros utilizados para su transformación a coordenadas reales (coordenadas mundo).

En la implementación aplicada sobre todo este proceso se diferencian dos vías a tomar. La primera de ellas corresponde al desconocimiento de los puntos de control entre el plano imagen y plano terrenal, únicamente disponiendo de las coordenadas del avión y realizando las transformaciones manualmente.

La otra vía a seguir es mediante el cálculo de los puntos de control del plano imagen una vez se tengan los del plano real. De esta manera se aplicaran métodos de transformaciones automáticas proporcionados por ESRI. Este proceso es descrito en el apartado 5.1.7.

5.1.1 Paquetes de Misión

La información del avión respecto a los parámetros de la cámara así como las coordenadas del UAV en el momento de la toma de la imagen, se envían en paquetes de misión. Estos paquetes son ficheros XML.

Se implementa un método de lectura de estos paquetes, cuya información será guardada en la clase *Misión Package*. Esta clase dispone de los datos de posición (clase *position*), ángulos del avión (clase *angles*), información sobre los parámetros de la cámara e información de la imagen a rectificar (clase *misión info*).

La clase *NewOrtho* en su constructor rellenara los todos sus atributos a partir del paquete de misión. En el anexo D.1 se encuentra un ejemplo del modelo XML de paquetes de misión.

5.1.2 Visualización de las coordenadas de la posición del avión

Para localizar sobre la cartografía las coordenadas de la toma fotográfica, se requiere de implementar un método que visualice estas coordenadas sobre el mapa. Cuando se habla de visualizar en el mapa se habla íntimamente de proyectar una coordenada o superficie sobre el mismo.

El mapa cartográfico se encuentra georeferenciado, disponiendo de un sistema espacial (*ISpatialReference*) formado por un sistema de coordenadas que será el requerido por la proyección de las coordenadas del avión para que sean correctamente visualizadas.

Las coordenadas del avión se presentan como un *Ipoint*, que contendrá la latitud y longitud de la posición del avión. Se le adjudicara el sistema de coordenadas del mapa y la proyección sobre el mismo. Se almacenara como un elemento grafico y se presentara correctamente visualizado en pantalla. Ejemplo XML misión en el apartado D.2.

5.1.3 Proyección de las coordenadas del avión

Para implementar este apartado primero se requiere de un análisis matemático mediante trigonometría. Se desarrollará la metodología a utilizar para poder proyectar las coordenadas del avión sobre el mapa. Estas coordenadas corresponden al punto central de la imagen fotográfica en el sistema de coordenadas del terreno, influenciadas por los ángulos del avión y la cámara.

Una vez obtenido el punto de proyección, se tratara como un elemento grafico, de esta manera será introducido en el contenedor gráfico del *mapcontrol* para poder ser visualizado.

5.1.4 Área de proyección

Esta área corresponde a la proyección de la fotografía sobre el terreno. Previamente a desarrollar código, se realiza un análisis matemático para encontrar una metodología de implementación.

Esta proyección se encuentra influenciada por los parámetros angulares del avión, por el punto origen proyectado y por la escala sobre los píxeles de la imagen. El área resultante se encontrará georeferenciada correctamente sobre el mapa, contendrá las coordenadas reales del terreno a partir de una transformación proyectiva bidimensional de las coordenadas imagen.

Una vez se dispone del área proyectada, para ser visualizada por pantalla, se interpreta como cuatro interfaces *Ilines*, independientes cada una por

contener diferentes coordenadas de las esquinas, dependiendo el lado del paralelogramo a dibujar. Análisis matemático en el anexo C.3.

5.1.5 Georeferenciación de la imagen

Llegados a este punto, se dispone del *Ienvelope* de la imagen (área que ocupa) en el terreno. Se pretende trasladar sin rectificar la imagen sobre el mapa.

Conociendo la ubicación de la imagen mediante el *path* contenido en el paquete de misión y su correspondiente nombre, se realizará una conversión de la fotografía aérea a un *Raster Dataset* (Interfaz que almacena información de los píxeles de la imagen). Para ello se hará uso de las interfaces *Iworkspacefactory*, *IrasterDataSet* e *Iraster*. El motivo es para poder realizar modificaciones sobre la imagen utilizando las funcionalidades de estas interfaces.

La imagen no georeferenciada con formato .jpg contiene unas coordenadas imagen carentes de sistema espacial de referencia. Estas coordenadas de los píxeles serán modificadas, asignándoles las previamente calculadas en el apartado anterior, correspondientes a sus posiciones sobre la cartografía.

El *raster* será introducido en un capa raster *IrasterLayer* para poder ser visualizado sobre el *mapcontrol*.

5.1.6 Rectificación de la imagen

Una vez localizada la imagen sobre el plano solo queda realizar las rectificaciones convenientes respecto a escala de las celdas del *raster*, rotaciones y traslaciones para que quede adaptada a su área de proyección en la cartografía.

Para poder realizar las modificaciones pertinentes se hace uso del *IRasterproc*, interfaz con funcionalidades para poder modificar el sistema espacial de referencia de la imagen, el tamaño de las celdas y el tipo de transformación que se aplica sobre los *arrays* de píxeles que la forman.

El raster ha de ser debidamente proyectado sobre el mapa, esto quiere decir que se debe de aplicar una transformación a cada píxel de la imagen para que quede bien adaptado a la ubicación correspondiente.

Como se comento en el capítulo anterior, cada *raster* además de tener un *IspatialReference* y un *extent* (*Ienvelope*) requiere de una geotransformación propia, para así poder aplicarla debidamente a cada celda de la imagen *raster* a la hora de ser visualizada. Ejemplo proyeccion *Raster* en el anexo D.3.

5.1.7 Geotransformación mediante puntos de control

Este proceso requiere previamente un cálculo de los puntos de control del plano imagen de la fotografía. Este plano como se comentó en capítulos anteriores, situado a la distancia focal de la cámara, contiene coordenadas de los píxeles de la imagen que corresponden a las del plano terrenal pero sufriendo una serie de cambios de rotación, traslación y escala.

Se obtiene estos puntos de control utilizando los métodos de área proyectada pero teniendo en cuenta esta vez la distancia focal y la resolución de la cámara.

Una vez se tienen los puntos de control y conociendo el sistema espacial del mapa, se genera la transformación *IAdjustXform*, interfaz construida sobre un algoritmo que combina una transformación polinomial y una técnica de interpolación TIN para ajustar los puntos de control localmente. Dependiendo del número de puntos de control que se disponga se utilizará una aproximación diferente, constando de un mínimo de 3 puntos de control la aproximación de orden 1.

Una vez se construya la transformación, será aplicada al *raster* que contiene la imagen a georeferenciar. De esta manera se realizará un ajuste de tamaño para el *extent* y celdas del *raster*. Los cambios producidos serán guardados en un nuevo *raster*.

Finalmente el *raster* resultante será introducido en una capa del *mapcontrol* utilizado [Anexo D.4].

5.2 Pruebas Unitarias

Durante la implementación de los objetivos marcados en el procesado de información aérea, el código diseñado ha estado a prueba constantemente. Cada etapa ha sufrido de pruebas de validación antes de pasar a las siguientes. De esta manera se asegura que errores encontrados en cada una de las fases, no correspondieran a las anteriores.

Se han realizado pruebas para verificar la correcta visualización de las fotografías sobre el mapa así como sus correspondientes proyecciones de puntos de control. Se ha de tener en cuenta que no se disponía de imágenes aéreas no georeferenciadas correspondientes a la zona de Castellar del Vallés, por tanto las imágenes utilizadas no cuadran correctamente sobre el mapa, sin embargo sirven de ejemplo para corroborar la georeferenciación.

Ejemplos de estas pruebas son:

- ◆ Visualización del punto de coordenadas del avión:

Conociendo previamente las coordenadas del avión se comprueba que la ubicación del punto sobre la pantalla corresponde a idénticos valores.

Esto se cumple al aplicar un método que muestra en *labels* las coordenadas del *rubber* por su paso sobre el mapa.

◆ Visualización punto de coordenadas proyectado:

Utilizando el método mencionado anteriormente se corrobora que la ubicación en el mapa del punto proyectado es similar a la calculada teóricamente mediante el análisis matemático [Fig 5.3.1].

◆ Visualización del área de proyección:

Los puntos de las esquinas del paralelogramo coinciden con los calculados teóricamente.

◆ Georeferenciación de la imagen:

Se comprueba que la visualización de la imagen coincide con el área de proyección previamente visualizada.

◆ Rectificación de la imagen:

La imagen sufre transformaciones en cuanto a tamaño y ubicación que son visualizadas sobre el mapa.

◆ Visualización de imágenes mediante métodos de transformaciones polinómicas:

La fotografía aérea aparece sobre la cartografía perfectamente ubicada.

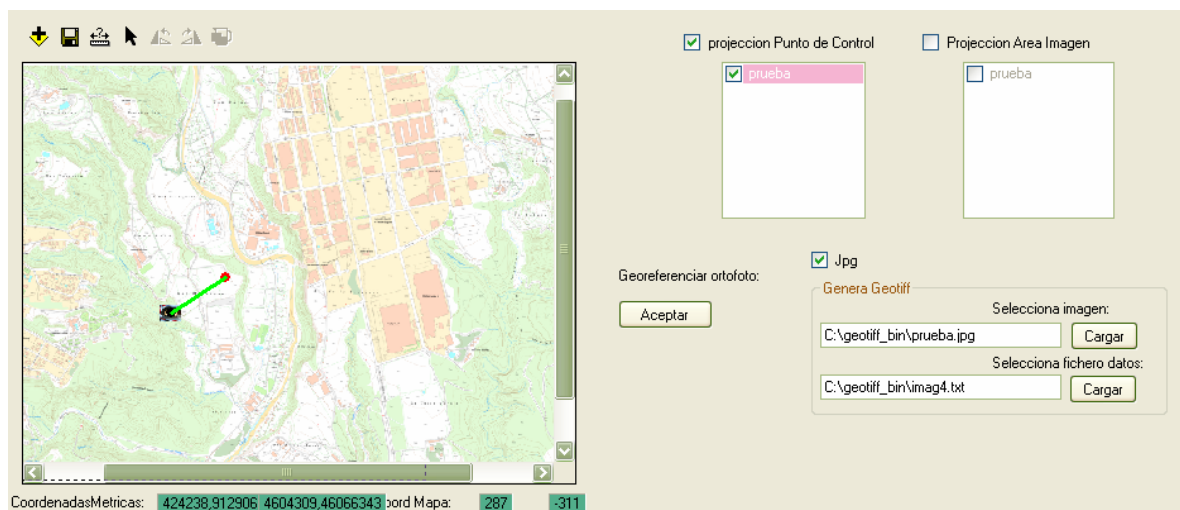


Fig 5.3.1 Ejemplo punto e imagen proyectados

5.3 Integración

La integración debe corroborar el correcto funcionamiento en conjunto de las diferentes partes de la aplicación, habiendo sido cada una de ellas ya verificada individualmente. Para la comprobación de su efectividad se realizan pruebas a fin de ver que el flujo de datos es el adecuado.

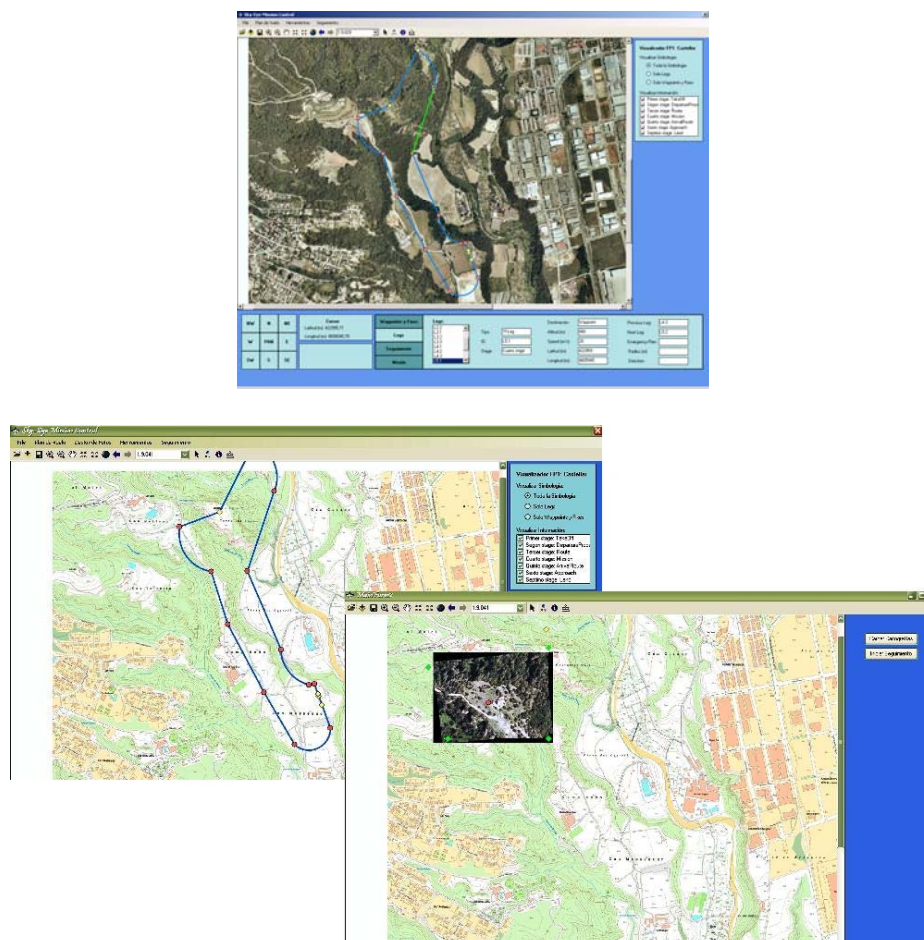
El proceso de integración se protagoniza por el acoplo entre las clases creadas para el procesado de información, planes de vuelo, misión y su correcta visualización en pantalla en el momento de la simulación.

Se crea la clase *ExchangeArea* para la comunicación entre los diferentes flujos de datos. Cada vez que se intente acceder a algún tipo de información se debe pasar por ella.

Mediante un ejemplo de plan de vuelo XML la información queda contenida las clases con el fin de visualizar la misión, plan de vuelo y localización del avión.

Se diseña un segundo formulario además del principal, el cual será independiente y contendrá la visualización del procesado de información.

Fig 5.3.1 Resultados finales de la integración de la aplicación



CAPITULO 6. BALANCE

Una vez finalizado el proyecto se requiere de un estudio de la productividad y de la presencia de cambios importantes en la planificación inicial. Del resultado de este estudio dependerá en gran medida el presupuesto real que ha supuesto la realización del proyecto.

6.1 Planificación

La planificación inicial ha tenido durante el transcurso del proyecto algunas modificaciones ya que la duración de las tareas era solamente una aproximación. No se podía tener conocimiento de la dificultad encontrada o de las limitaciones que se podrían tener. La duración del proyecto estimada desde un principio no se ha cumplido, el tiempo calculado era alrededor de 4 meses pero ha resultado ser de 5 meses. La dedicación diaria ha seguido siendo de 5 horas, sin embargo además de los días laborables se han dedicado fines de semana.

Las modificaciones de la planificación corresponden a las siguientes:

- ◆ **Cambio de fechas en la fase de selección del GIS adecuado.** En esta tarea se realizó una mayor dedicación temporal por motivos del análisis de diferentes herramientas disponibles en el mercado. Era el motor fundamental para el avance del proyecto, una vez escogida la herramienta, sólo dependería de la dedicación y del esfuerzo, llegar a cumplir con los objetivos marcados. Sin embargo esta selección, al ser minuciosa, provocó retrasos en la planificación.
- ◆ **Variación de fechas en el análisis de librerías, diseño y pruebas.** Esta etapa tuvo retrasos ya que entender el funcionamiento de las librerías de *Arcgis* y de herramientas que proporcionaba resultó ciertamente complejo.

Uno de los motivos por los que se aprecia retraso fue el intento de utilizar capas para visualizar los elementos en el mapa. Se dedicó bastante tiempo en conseguir tener elementos independientes en cada capa, a causa de utilizar las librerías y métodos de *Arcgis*. Se pretendía que cada clasificación de los objetos como pueden ser *waypoints*, *legs* etc, fueran en capas diferenciadas dentro de un mismo mapa y con la posibilidad de ser seleccionados dependiendo de la capa que se encontrase activa. Finalmente no se logró conseguir y después de la dedicación de tiempo que supuso llevó a la conclusión de tomar otras vías para conseguir el objetivo.

- ◆ **Ubicación de los puntos de control en el mapa.** A partir del conocimiento de las coordenadas de la posición del avión en el momento de la captura de la imagen provocó que el proceso de localización de los puntos requiriera de un aumento en el análisis.

- ◆ **Utilización de las librerías de ESRI para georeferenciación.** Supuso una dedicación bastante elevada debido a la complejidad de estructura y relación entre las diferentes interfaces. Se ha necesitado de un aumento de pruebas y análisis sobre las implementaciones.

El rendimiento durante todo el proyecto ha sido un poco variable ya que ha habido épocas de dedicación más intensa, menos intensa y periodos de pausa. Los dos primeros meses han sido de una intensidad normal, el mes de abril y parte de mayo el ritmo fue muy bajo debido a los exámenes parciales, vacaciones. Es en el mes de junio cuando el proyecto empieza a tomar una intensidad bastante elevada.

La planificación final indica el verdadero transcurso del proyecto. La figura siguiente muestra las tareas que van relacionadas.



Fig. 1.4.1 Planificación Final

En comparación con la planificación inicial se puede apreciar que el resultado de las fechas ha sufrido una gran variación. La planificación final presenta la necesidad de dedicar el mes de junio para poder conseguir los objetivos marcados. A causa del retraso en el mes de Abril y mayo el avance del proyecto ha requerido la dedicación fuera de horarios laborales convencionales, teniendo que utilizar fines de semana para desarrollar diversas tareas.

6.2 Costes

Una vez finalizado el software se realiza una tarificación y determinación de los costes que han supuesto todo el proceso. Esto servirá para contrastar si coinciden con la estimación hecha en un principio (ver apartado 1.4.3) o si han supuesto un gasto mayor o menor.

La ejecución del proyecto ha requerido:

- ◆ Disponer de tres puestos de trabajo, equipados de tres equipos. Los ordenadores utilizados corresponden a Procesadores Intel Pentium D 805 a 2.66GHz, 1024MB de memoria, 160GB de disco duro, Grabadora.

- ◆ Tres monitores TFT de 19", con resolución 1280x1024.
- ◆ Se necesita de la herramienta de programación Visual Studio 2005 instalada en tres computadoras.
- ◆ Para el desarrollo de la aplicación se ha de disponer como se ha comentado anteriormente, la API de ESRI Arcgis-Engine usando .NET. Su utilización requiere de la compra de una licencia para tener un uso completamente disponible a todas sus herramientas.

Finalmente el coste total del material utilizado se recoge en la tabla 1.2.

Taula 6.2.1 Coste Material Utilizado

Material	Precio	Unidades	Total
Computadoras	1.000 €	3	3.000 €
Licencia Windows XP	159 €	3	477 €
Licencia Microsoft Office 2007	450 €	3	1.350 €
Licencia Visual Studio 2005	679 €	3	2.037 €
Licencia ArcGis			1.750€
Licencia Share-point			2000 €
Materiales de oficina			500€
Coste total [Euros]			11.114 €

Una vez desarrollada la nueva aplicación se deberá pagar 500€ por cada estación en concepto de licencia por el módulo *runtime* de Arcgis-Engine.

Los equipos de trabajo pueden variar dependiendo de las necesidades de la empresa, los aquí dispuestos son los utilizados por el proyecto SKY-EYE.

Los costes respecto a las horas de trabajo de los proyectistas han sufrido variaciones. Estas variaciones son debidas a la necesidad de dedicar más horas de trabajo a algunas tareas. Se diferencian dos tablas que representan las horas para el desarrollo del trabajo referido en esta memoria y una tabla general donde se recoge el coste que supone el desarrollo del prototipo completo de la estación de seguimiento. En la tabla 6.2.3 los desarrolladores resaltados de color verde corresponden a los costes por el diseño GUI y los resaltados de azul a los costes por gestión del plan de vuelo.

Tabla 6.2.2 Tabla costes para el procesado de información

Desarrolladores	Implicados	Horas	€/Hora	Coste Total
Analistas	1	248	32	7.936 €
Programadores	1	220	25	5.500 €
Documentadores	1	151	20	3.020 €
Coste total [Euros]				16.456€

Taula 6.2.3 Costes empleados total

Desarrolladores	Implicados	Horas	€/Hora	Coste Total
Analistas	1	190	32	6.080 €
Programadores	1	300	25	7.500 €
Documentadores	1	120	20	2.400 €
Analistas	1	198	32	6.336 €
Programadores	1	302	25	7.550 €
Documentadores	1	111	20	2.220 €
Coste total del procesado de la información				16.456 €
Coste total				48.542 €

Teniendo en cuenta los costes anteriores por el material utilizado y el total de los integrantes para llevarlo a cabo, el precio definitivo del proyecto es de 59.656 €. El resultado final es bastante elevado, esto se debe al incremento de horas necesitadas en el trabajo de los desarrolladores y la necesidad de compra de licencias para el uso de las herramientas.

Comparaciones con la planificación de costes inicial:

Al comparar la tabla 1.6.2.2 y la tabla 6.2.3 se puede apreciar el incremento de los costes debido al incremento de horas dedicadas al proyecto

Tabla 6.2.4 Comparativa de costos Reales y estimados

Recursos	Dedicación (horas)		Coste	
	Estimado	Real	Estimado	Real
Analistas	390	549	12.480 €	18.138 €
Programadores	705	822	17.625 €	20.550 €
Documentadores	240	469	4.800 €	9.380 €
Total Proyecto	1335	1840	39.905 €	48.542 €

Como se puede apreciar 6.2.4, esta desviación supone un coste adicional de 8.637 €.

En el mundo real esto podría suponer un problema, ya que a la hora de hacer la planificación estamos determinando el tiempo que invertimos y una desviación como la que se ha producido podría suponer muchos dineros para la empresa.

6.3 Posibles mejoras

La aplicación está completa en su totalidad, sin embargo a la hora de hablar de posibles mejoras me refiero a un aumento en la funcionalidad de la estación de seguimiento:

- ◆ Se podría realizar la opción de diseño de planes de vuelo. Esta opción daría soporte a la realización del vuelo que se crea conveniente para el UAV, sin la necesidad de realizarlo mediante otra aplicación independiente.
- ◆ La utilización de capas de *Arcgis* para controlar objetos cartográficos, etc. Se podría utilizar o implementar un control que se encargase de manera independiente del trato de cada capa y de su contenido.
- ◆ Funcionalidades mas avanzadas de rectificación, con posibilidad de elección del tipo de georeferenciación u ortonormalizacion a aplicar a la imagen.
- ◆ Tener la posibilidad de modificar las imágenes por parte del usuario, una vez hayan sido georeferenciadas. Esto se refiere a cambiar su rotación, posición, etc.

CAPITULO 7. CONCLUSIONES

Este capítulo explica si se ha conseguido alcanzar los objetivos iniciales, las conclusiones finales y las líneas futuras del trabajo.

7.1 Objetivos Generales

Los objetivos propuestos en un principio en el apartado 1.3.1 han requerido de ciertas modificaciones y cambios respecto a su realización pero se han conseguido cumplir satisfactoriamente. Estos objetivos resultan de la integración de los tres TFCs, habiendo realizado previamente un periodo común, antes de la especificación de cada integrante.

La realización de cada parte ha obtenido buenos resultados según las planificaciones iniciales, aunque han presentado algunas modificaciones por ajuste de fechas.

La parte encargada del diseño GUI de la aplicación primeramente no estaba muy concretada, pero a medida que el proyecto avanzaba se definía de una manera más clara. Finalmente se ha conseguido obtener un diseño GUI del seguimiento del plan de vuelo y la misión, muy atractivo y que cumple con lo especificado en un principio.

Otro objetivo conseguido ha sido el lector del plan de vuelo. Se basa en la lectura de XMLs donde se encuentra toda la información referente a los planes de vuelo y misión. Desde un principio se tuvo un modelo XSD del plan de vuelo con el que se generaron las clases de la aplicación pero tuvieron que ser modificadas debido a sucesivos cambios e in completitud de éste.

La parte encargada del procesado de la información no ha sido todo lo satisfactoria que hubiese cabido esperar. Se ha conseguido visualizar fotografías sobre el mapa una vez han sido georeferenciadas y rectificadas, cuyos parámetros eran recogidos mediante los paquetes de misión. Sin embargo la ortorectificación de las imágenes para su mejor integración sobre las cartografías requería de disponer de fotografías aéreas reales que corroborasen que la metodología era correcta. La implementación además de la realización de las pruebas requería disponer de más tiempo para llevarlo a cabo debido a que es un tema bastante complejo.

Finalmente el prototipo de estación de seguimiento resultante es un buen comienzo para ser utilizada en cuestiones de prevención de incendios, por lo que cumple el objetivo buscado por el proyecto SKY-EYE.

7.2 Objetivos individuales

De forma global se puede decir que el objetivo principal, la georeferenciación de imágenes aéreas, se ha conseguido satisfactoriamente. Sin embargo, algunas de las expectativas que se pretendían conseguir en un principio no se

han llegado a cumplir. Esto se refiere concretamente a la ortonormalización de imágenes. A continuación se revisan los objetivos iniciales que se detallan en el apartado 3.2.2. Para ver más claramente como se ha desarrollado cada parte.

- ◆ **Cálculo punto de proyección origen.** Este objetivo se ha cumplido completamente. Se han analizado metodologías de transformación de coordenadas para poder conseguir su proyección sobre el mapa. Se han requerido parametrizaciones angulares de la cámara para las rotaciones respecto al plano ideal y finalmente se visualiza correctamente sobre la cartografía.
- ◆ **Cálculo del área proyectada.** Este objetivo ha sido complejo debido a que se desconocían los puntos de control entre la imagen y el plano terrenal. Para cumplir este objetivo se han utilizado las coordenadas del avión y los parámetros de la cámara en el momento de la toma fotográfica. Ha requerido numerosos cálculos intermedios para conseguir los puntos de control de las esquinas de la imagen. Finalmente se ha visualizado correctamente el área en el mapa.
- ◆ **Proyección de la imagen georeferenciada.** Supone el punto fuerte del proyecto y el que ha resultado más complicado. Ha requerido mucha dedicación en cuanto a la comprensión del problema, el estudio de librerías y a la implementación se refiere. Finalmente se ha conseguido visualizar la imagen rectificadas y georeferenciadas sobre la cartografía pero siendo difícil de corroborar la corrección del procedimiento al no disponer de fotografías aéreas reales.
- ◆ **Generación de Ortofotos.** A partir de la imagen ya rectificadas, se consigue crear una nueva ortofoto de formato TIFF con los nuevos valores de transformación.

7.1 Conclusiones generales

En un principio se planteó la idea de utilizar un GIS de cara a la realización de la aplicación, sin embargo mediante el análisis de sus funcionalidades se creyó más eficiente la utilización de la API de ESRI para .NET y crear un programa propio. Esto causó algunos problemas a la hora de afrontar las librerías dispuestas por ESRI, concretamente al realizar diversas pruebas sobre el tratado de capas. De esta manera se pretendía tener el control de objetos visuales sobre las cartografías, además de la visualización del plan de vuelo. Finalmente después de una extensa dedicación poco fructífera y de innumerables pruebas, se llegó a la conclusión de tomar alternativas para conseguirlo, utilizando otro tipo de metodologías que se alejaban un poco del concepto original pero que lo realizaban de manera eficiente.

La aplicación resultante después de todo el periodo de desarrollo cumple con las expectativas iniciales, claro está, adaptándose a ciertas características que aún estaban sin definir. Técnicamente la aplicación es capaz de simular en su gran totalidad a un GIS, visualizar y hacer el seguimiento tanto del plan de

vuelo como de la misión del UAV, así como la visualización de la información recopilada.

Finalmente añadir que, además de los conocimientos requeridos para realizar los objetivos concretos del proyecto, se han adquirido otro tipo de habilidades que no estaban del todo bien desarrolladas, éstas corresponden principalmente a la búsqueda de información aplicable, organización laboral, reconocimiento de prioridades en el trabajo y metodologías de gestión de proyectos.

7.2 Conclusiones individuales

El proceso de georeferenciación de fotografías aéreas ha sido bastante duro ya que ha requerido de una dedicación de horas bastante elevada debido a la complejidad del problema. Se pretendía llegar a resultados más avanzados pero por la concreción de fechas estipuladas de cara a cursar el segundo ciclo de la Ingeniería de Telecomunicación y la consiguiente necesidad de tener finalizado el TFC, no se han podido conseguir.

El procesado de la información es un tema que requiere de una dedicación mucho más elevada de la disponible en este proyecto. Para una mejor disposición de la información por pantalla y adaptación de las imágenes a las cartografías requería haber empezado en fechas muy anteriores a las dispuestas o retrasar el proyecto hasta septiembre. En todo caso se han obtenido resultados satisfactorios que cumplen las expectativas dispuestas.

He adquirido conocimientos en sistemas de información geográfica y la utilidad que representan en el ámbito de información territorial. He obtenido conocimientos del trato de las imágenes aéreas, los formatos disponibles, transformaciones para su georeferenciación, metodologías de rectificación etc.

Finalmente señalar que todo el transcurso del proyecto SKY-EYE me ha aportado grandes satisfacciones. Ha sido una etapa de aprendizaje en todos los sentidos, no sólo en el ámbito de la programación, que sin duda espero aprovechar y repetir en el futuro.

7.3 Estudio de la ambientalización

El proyecto SKY-EYE fundamentalmente tiene beneficios de cara a la ambientalización ya que principalmente está dedicado a la prevención de incendios forestales. Este proyecto enfocado al seguimiento de un avión y al procesado de la información capturada desde el aire sirve como análisis territorial en el momento de la toma de fotografías, de manera que se tendrá conocimiento del estado ambiental.

Este proyecto es de ámbito civil sin embargo puede tener diversas interpretaciones, siendo una de ellas el estudio ambiental ya que la ejecución del plan de vuelo sobre una determinada zona obtendrá visualmente características sobre la fauna, posibles cambios forestales, presencia de

nuevos efectos meteorológicos etc, que desde el punto de vista ambiental enriquecen el conocimiento actual de la zona.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Geometric transformations
<http://www.css.taylor.edu/~btoll/s99/424/res/mtu/Notes/geometry/geotran.htm>
- [2] Mapping interactivo. Flujo de trabajo en fotogrametría digital
http://www.mappinginteractivo.com/plantilla-ante.asp?id_articulo=313
- [3] Mapping interactivo. Fotoaerotriangulación espacial
http://www.mappinginteractivo.com/plantilla-ante.asp?id_articulo=819
- [4] The Basic of photogrammetry
<http://www.geodetic.com/whatis.htm>
- [5] MaNIS/HerpNet/ORNIS Georeferencing Guidelines
<http://manisnet.org/GeorefGuide.html#glossary>
- [6] GeoTIFF
<http://remotesensing.org/geotiff/geotiff.html>
- [7] Project Raster Work
http://edndoc.esri.com/arcobjects/9.2/NET/shared/geoprocessing/data_management_tools/project_raster_data_management_.htm
- [8] Chapman, A.D. and J. Wieczorek (eds). 2006. *Guide to Best Practices for Georeferencing*. Copenhagen: Global Biodiversity Information Facility.
- [9] gvSig
<http://www.gvsig.gva.es>
- [10] Georeferencing tool
http://www.calacademy.org/research/informatics/GeoRef/Main_Pages/3_Instructions.htm
- [11] GRASS
<http://www.geog.uni-hannover.de/grass/index.php>
- [12] ESRI
<http://www.esri.com>
- [13] Transformation of coordinates
<http://www.ping.be/~ping1339/coortf.htm#Projective-propertie>
- [14] Transformación Afin
<http://www.aplitop.com/soporte/manuales/mdt/Topografia/transformacinafn.htm>
- [15] Precision image mapping: georeferenced imagery
<http://gis2.esri.com/library/userconf/proc99/proceed/papers/pap592/p592.htm>
- [16] Rafael Molina: Departamento. Ciencias de la Computación e I.A. Movimiento rígido de planos en el espacio. Proyección en el plano imagen.

- [17] David García Selles. Fotogrametría terrestre digital con cámaras no profesionales
- [18] Josefa Garcia León, Aurora Cuarteto Sáez. Comparación de los procesos de rectificación y ortoproyección mediante fotogrametría terrestre digital
- [19] World file for raster dataset
http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.2/index.cfm?TopicName=World_files_for_raster_datasets
- [20] Pagina de FreeGIS
<http://freegis.org>
- [21] Jiménez Berni, Jose Antonio; Aguilera Ureña, Maria Jesús. Alternativas de software libre a los sistemas de información geográfica comerciales
- [22] Amplia Web sobre GIS
<<http://www.gabrielortiz.com>>
- [23] Gómez Delgado, Monserrat; Barredo Cano. Sistemas de informacion geográfica y evaluacion multicriterio en la ordenacion del territorio.
- [24] The source for GIS and mapping software
<http://software.geocomm.com/raster>
- [25] Interfaz IgeoReference
<http://edndoc.esri.com/arcobjects/9.0/default.asp?url=/arcobjects/9.0/Java/arceengine/com/esri/arcgis/cartol/GeoReference.html>>
- [26] MSDN Visual C# General
<http://forums.microsoft.com/MSDN/ShowForum.aspx?ForumID=31&SiteID=1>
- [27] Georeferencing and coordinate systems
http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.2/index.cfm?id=24&pid=22&topicname=Georeferencing_and_coordinate_systems
- [28] Precision Image Mapping: Georeferenced Imagery.
<http://gis2.esri.com/library/userconf/proc99/proceed/papers/pap592/p592.htm>
- [29] Georeferenciación de imágenes
http://www.cartografia.cl/index.php?option=com_content&task=view&id=321&Itemid=46
- [30] Las bases de la fotogrametría. Introducción a cómo se trazan mapas a partir de fotografías aéreas.
<http://www.gabrielortiz.com/index.asp?Info=023a>
- [31] Colección de software GIS gratuito
<http://www.gabrielortiz.com/index.asp?Info=063>
- [32] Recopilación de teoria de GIS: Core Currículum in GIS de la NCGIA
<http://www.gabrielortiz.com/index.asp?Info=071>
- [33] Geographfic information systems (GIS): Libro digital
<http://www.gabrielortiz.com/index.asp?Info=078>

ANEXO

A. Selecciones de GIS

Fig. A.1 Primera selección de GIS

	Mark	15%		5%		40%		20%		5%		15%	
		BBDD	Georeferenciar Ortonormalizar	Programabilidad	Formatos	S.O.	Licencia						
ARCGIS	8.5	SI	SI	VB C++ C#	10	Cualquier SO conocido	10	0					
gvSIG	8.2	SI	Geo	Java	8	Windows Linux Mac OS X	8	9					
QUANTUM	8.2	PostGreSQL	Geo	C++	8	Windows Linux	8	9					
TerraLib	7.5	SI		C++	8	Windows Linux	5	9					
GRASS	7.3	SI	Geo	Código Abierto	8	Linux	7	7					
ERDAS	7.25	SI	SI	C++	7	Win2000XP	10	0					
PostGIS	6.35	SI	?	C C++ Java PL Ruby PL Tcl	6	?	7	7					
MapMaker	6.1	SI	Geo		5	Windows	8	4					
GDAL/OGR	6.05	NO	NO	C++	7	Microsoft Win9x, ME, NT, 200, XP	8	8					
HidroGIS	5.75	SI	?	Java	6	?	6	7					
Kosmos	5.5	SI	Geo	Java	5	Linux Windows	5	6					
MiralMon	3.95	SI	SI		0	Microsoft Win9x, ME, NT, 200, XP	7	5					
Oracle Spatial-	3.85	SI	?		0	?	8	1					
Spring	3.8	SI	?	Código Cerrado	0	Windows, Linux	6	6					

Fig A.2 Segunda selección

GIS	Ventajas	Desventajas
ArcGis Erdas OracleSpatial AutocadMap	Muy Completo	Costes de licencias muy altos
gvSIG	soft libre, programable, código abierto	"no" ortonormaliza
PostGis	BBDD PostGree, código abierto, soft libre	ortonormaliza?
Kosmos	Soft libre, código abierto	ortonormaliza?
Grass	Soft libre, BBDD, Código abierto	
Quantum	BBDD PostGree, código abierto, soft libre	ortonormaliza?
Miramon	BBDD muy amplias, georeferenciación y ortonormalización, diversos formatos	licencia 228€, código cerrado
MapMaker	BBDD, georeferenciación, código abierto	300€ versión pro
e-Foto	Mucha información de fotogrametría, software libre	BBDD?, georeferenciación?

B. ArcGis Engine

B.1 Estructura de librerías

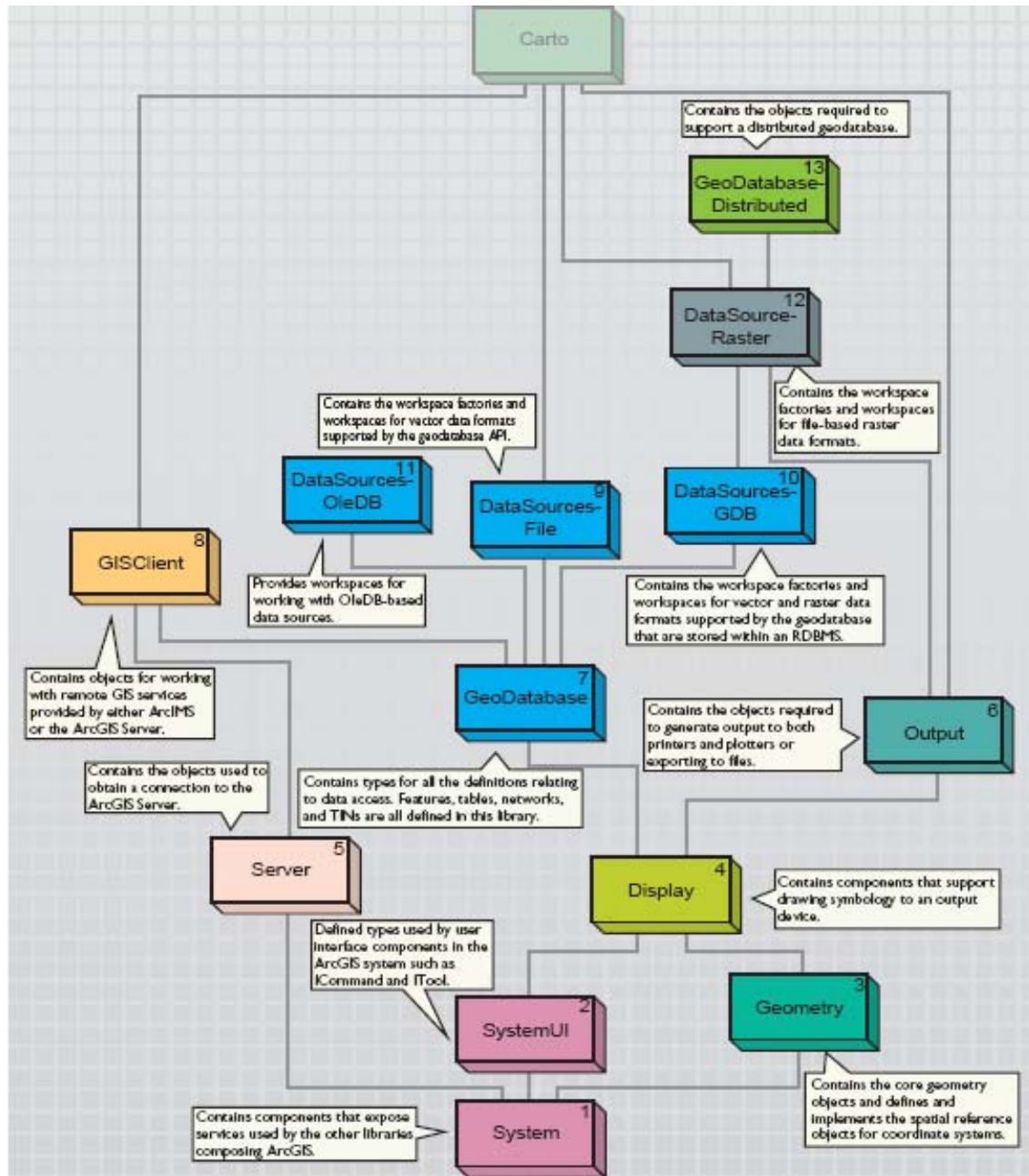


Fig B.1. Estructuras de librerías de ArGis

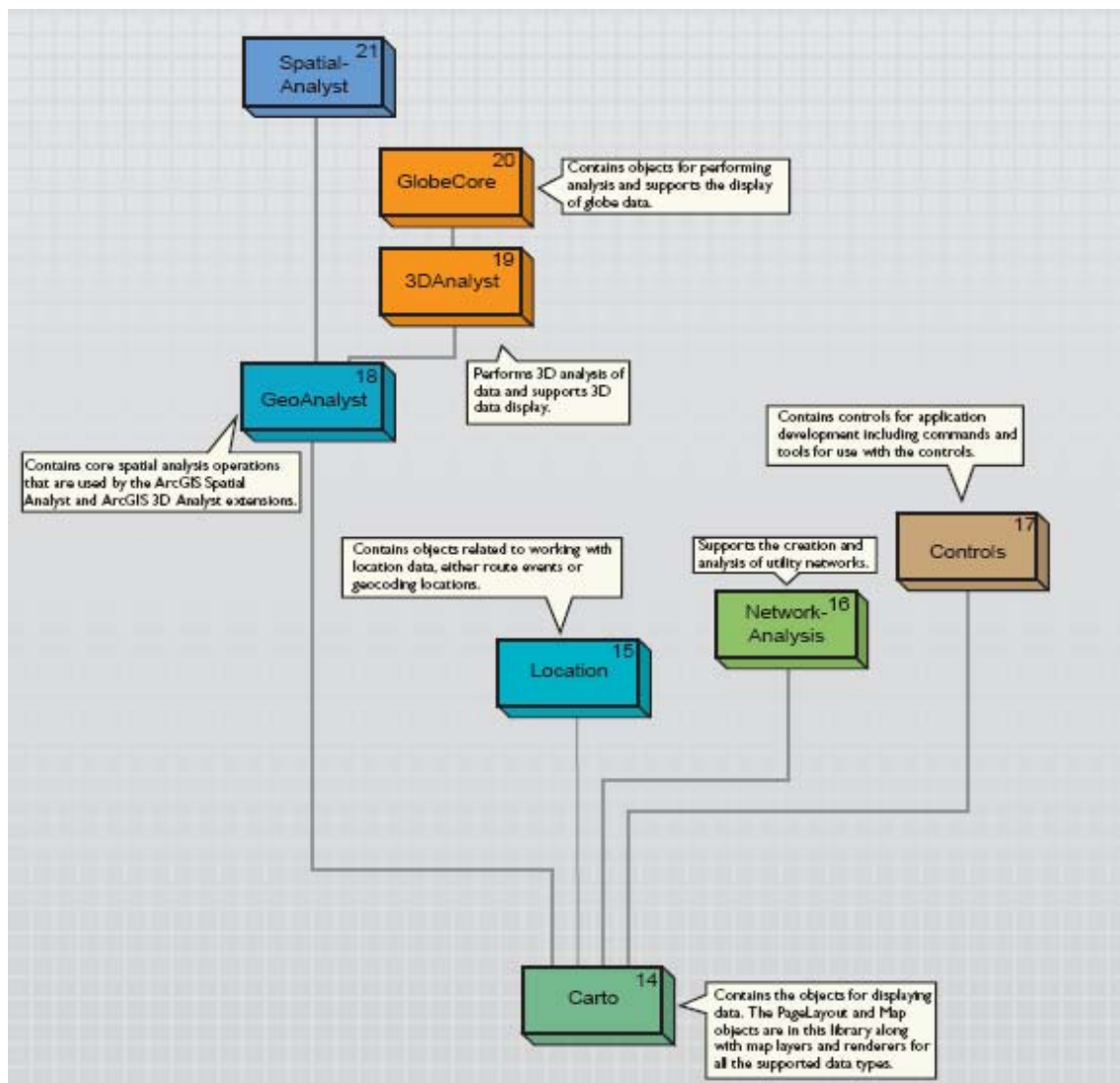


Fig B.1 Arquitectura de librerías de ArcGis

B.2 Librerías

- ◆ DataSourceGDB: Contiene la implementación de la GeoDatabase API para los archivos basados en fuentes de datos de Microsoft OLE DB.
- ◆ DataSourcesNetCDF: Contiene objetos para acceder a archivos netCDF.
- ◆ GeoDataBseDistributed: Provee herramientas para importar y exportar datos de una geodatabase.
- ◆ GeoDataBseExtensions: Provee herramientas para la creación, mantenimiento, y uso de datos del terreno. No se recomienda su uso en esta versión del kit.

- ◆ **GlobeCore:** Contiene objetos para trabajar en el Globo en la misma manera que Carto los tiene para trabajar en un plano.
- ◆ **TrackingAnalyst:** Implementa la interfaz no-usuario de la extensión - TrackingAnalyst para ArcGIS.
- ◆ **Controls:** Son utilizadas por los programadores para crear o extender las capacidades de sus proyectos utilizando las herramientas de ArcGIS. Los controles ArcGIS simplifican el desarrollo del proceso mediante la encapsulación en ArcObjects y brindando unas API. Entre los controles podemos encontrar el MapControl, PageLayoutControl, TOCControl (Table of Contents), ToolbarControl, GlobeControl, SceneControl, LicenseControl y SymbologyControl juntamente con una colección de control de comandos.
- ◆ **MilitaryAnalyst:** Implementa la funcionalidad de la interficie no-usuario de las extensiones Military Analyst.
- ◆ **MOLE:** Contiene objetos para visualizar de simbología militar.
- ◆ **NetworkAnalisis:** Tiene objetos para analizar información de redes una vez estén cargadas en las bases de datos.
- ◆ **Location:** Contiene objetos que dan soporte al geocoding y para trabajar con eventos de rutas.
- ◆ **GeoAnalyst:** Contiene objetos que soportan funciones de análisis espacial. Estas funciones son utilizadas tanto en las librerías de ArcGIS Spatial Analyst como en ArcGIS 3D Analyst.
- ◆ **Animation:** Contiene objetos que permiten trabajar con animaciones en los mapas.
- ◆ **Maplex:** Controla el motor de direccionamiento y ubicación del los label Maplex.
- ◆ **GISClient:** Permite a los usuarios trabajar con servicios Web. Estos servicios web los provee ArcIMS y AcrGIS Server. La librería incluye objetos para conectarse con servidores GIS y hacer uso de sus servicios Web.
- ◆ **ArcWeb:** Contiene objetos para acceder a servicios ArcWeb.
- ◆ **NetworkAnalyst:** Contiene objetos para trabajar con redes de Datasets.
- ◆ **Schematic:** Implementa la interfaz no-usuario de la extensión Schematic.
- ◆ **3DAnalyst:** Es muy similar a Carto. Mientras Carto trabaja en dos dimensiones, 3DAnalyst realiza las funciones en tres dimensiones.

- ♦ Server: Contiene objetos que permiten conectar y trabajar con servidores ArcGIS. Output Trabaja con impresoras u otros dispositivos a los que enviar algo.

C. Desarrollos matemáticos

Este apartado describe la transformación afín para la conversión de coordenadas de la imagen a terrenales y los desarrollos para el cálculo de los puntos y áreas de proyección.

C.1 Transformación Afín

Esta transformación es usada comúnmente en fotogrametría para pasar coordenadas medidas del sistema de la imagen al sistema de marcas georeferenciadas. Se ha de conocer la localización común de los puntos de control entre la imagen y el mapa.

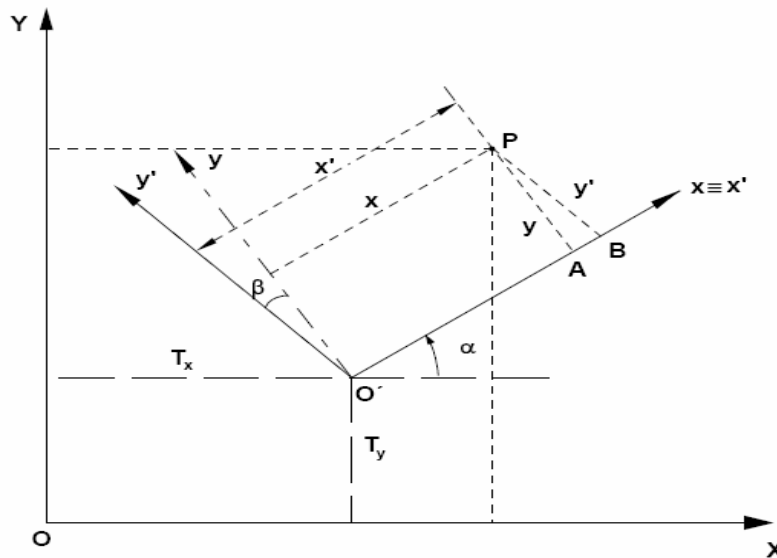


Fig. 3.1.3.1 Sistema arbitrario no ortogonal, girado, desplazado y con diferentes unidades de medida respecto al sistema de referencia.

- ❖ X, Y : sistema de coordenadas de referencia.
- ❖ x', y' : sistemas arbitrarios de coordenadas a transformar (no ortogonal).
- ❖ x, y : sistema arbitrario ortogonal.
- ❖ β : ángulo de falta de perpendicularidad entre los ejes (x', y') .
- ❖ α : ángulo de rotación entre ambos sistemas.
- ❖ λ_x : factor de escala en dirección del eje x .
- ❖ λ_y : factor de escala en dirección del eje y .

La relación entre los sistemas (x, y) y (x', y') es la siguiente:

$$\begin{aligned} \operatorname{sen} \beta &= \frac{AB}{PB} \Rightarrow AB = PB \operatorname{sen} \beta \Rightarrow AB = y' \operatorname{sen} \beta \\ \cos \beta &= \frac{PA}{PB} \Rightarrow PA = PB \cos \beta \Rightarrow PA = x' \cos \beta \end{aligned}$$

Las coordenadas de las expresiones aplicando los correspondientes coeficientes de escala para cada eje corresponden:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \alpha & -\operatorname{sen} \alpha \\ \operatorname{sen} \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & -\operatorname{sen} \beta \\ 0 & \cos \beta \end{pmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_x \\ \lambda_y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Tx \\ Ty \end{bmatrix}$$

Las expresiones de cambio de sistemas de referencia son:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \alpha & -\operatorname{sen} \alpha \\ \operatorname{sen} \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Tx \\ Ty \end{bmatrix}$$

Sustituyendo las expresiones anteriores queda:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \alpha & -\operatorname{sen} \alpha \operatorname{sen} \beta - \operatorname{sen} \alpha \cos \beta \\ \operatorname{sen} \alpha & -\operatorname{sen} \alpha \operatorname{sen} \beta + \cos \alpha \cos \beta \end{pmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_x x' \\ \lambda_y y' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Tx \\ Ty \end{bmatrix}$$

Desarrollando la expresión de transformación queda:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \alpha & -\operatorname{sen} \alpha \operatorname{sen} \beta - \operatorname{sen} \alpha \cos \beta \\ \operatorname{sen} \alpha & -\operatorname{sen} \alpha \operatorname{sen} \beta + \cos \alpha \cos \beta \end{pmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_x x' \\ \lambda_y y' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Tx \\ Ty \end{bmatrix}$$

Las coordenadas de un punto p (x', y') quedan de la siguiente manera:

$$[X] = ([A]^T [A])^{-1} [A]^T [L]$$

Finalmente quedan 6 parámetros sin resolver que corresponden a las incógnitas:

$$\begin{aligned} a &= \lambda_x \cos \alpha \\ b &= \lambda_y (\cos \alpha \operatorname{sen} \beta + \operatorname{sen} \alpha \cos \beta) = \lambda_y \operatorname{sen}(\alpha + \beta) \\ c &= \lambda_x \operatorname{sen} \alpha \\ d &= \lambda_y (\cos \alpha \cos \beta - \operatorname{sen} \alpha \operatorname{sen} \beta) = \lambda_y \cos(\alpha + \beta) \end{aligned}$$

Para determinar estos parámetros se pueden utilizar dos soluciones:

- ♦ La primera corresponde al conocimiento de un mínimo tres los puntos de control entre la imagen y el sistema de coordenadas real. Partiendo de conocer las coordenadas en ambos sistemas, de un número n de puntos de

control, siendo ($n \geq 3$) tendremos que cada punto da lugar a dos ecuaciones; por lo tanto tendremos un sistema con $2n$ ecuaciones con seis incógnitas.

$$P_i(x'_i, y'_i)(X_i, Y_i) i = 1, 2, 3, \dots, n$$

Con el sumatorio de cada una de las coordenadas de los n puntos podremos determinar las coordenadas del centro de gravedad del centroide proyectado. Estas coordenadas se pueden apreciar en la figura 1.1.3.2.

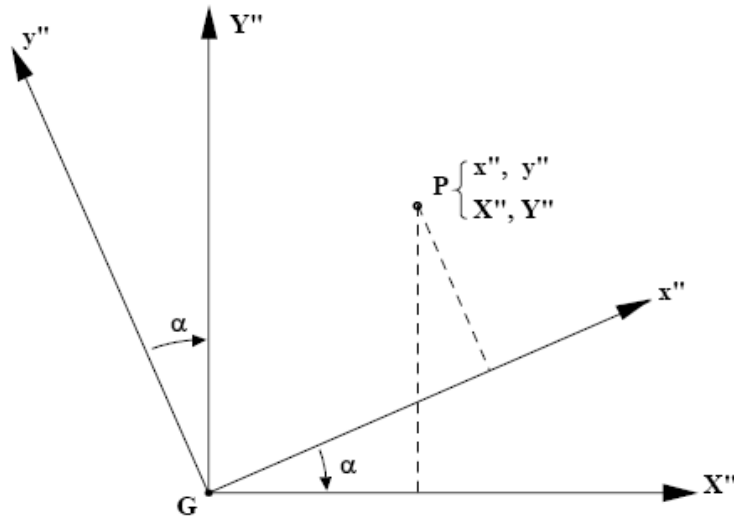


Fig. 3.1.3.2 Sistema de referencia con origen común en el centroide.

Las coordenadas del origen del centroide son:

$$x_G = \frac{\sum_{i=1}^n x'_i}{n}; y_G = \frac{\sum_{i=1}^n y'_i}{n}; X_G = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n}; Y_G = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i}{n}$$

Resultando las coordenadas de los n puntos con origen en el centroide:

$$\begin{aligned} x''_1 &= x'_1 - x_G; y''_1 = y'_1 - y_G; X''_1 = X'_1 - X_G; Y''_1 = Y'_1 - Y_G \\ x''_2 &= x'_2 - x_G; y''_2 = y'_2 - y_G; X''_2 = X'_2 - X_G; Y''_2 = Y'_2 - Y_G \\ &\cdot \\ &\cdot \\ x''_n &= x'_n - x_G; y''_n = y'_n - y_G; X''_n = X'_n - X_G; Y''_n = Y'_n - Y_G \end{aligned}$$

Para un número de puntos n igual o superior a 3 las forman las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned}
 X''_1 &= ax''_1 - by''_1; Y''_1 = cx''_1 - y''_1 \\
 X''_2 &= ax''_2 - by''_2; Y''_2 = cx''_2 - y''_2 \\
 X''_3 &= ax''_3 - by''_3; Y''_3 = cx''_3 - y''_3 \\
 &\cdot \\
 &\cdot \\
 X''_n &= ax''_n - by''_n; Y''_n = cx''_n - y''_n
 \end{aligned}$$

Una vez determinados los parámetros a b c d (factores de escala y giros) podremos deducir los valores de T_x y T_y . Partiendo de la expresión general:

$$\begin{aligned}
 X &= ax' - by' + T_x \\
 Y &= cx' + dy' + T_y
 \end{aligned}$$

Para un número n de puntos, siendo $n \geq 2$ las traslaciones se obtienen sin ninguna complicación, despejándolas de la expresión general.

$$T_x = \frac{\sum_{i=1}^n X_i - a \sum_{i=1}^n x'_i + b \sum_{i=1}^n y'_i}{n}; T_y = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i - c \sum_{i=1}^n x'_i + d \sum_{i=1}^n y'_i}{n}$$

◆ La segunda opción tiene como datos de partida:

$$P_i(x'_i, y'_i)(X_i, Y_i) i = 1, 2, 3, \dots, n$$

Partiendo de la fórmula general las ecuaciones de observación para n puntos serán:

$$\begin{aligned}
 P_1 &\Rightarrow X_1 = ax'_1 - by'_1 + T_x; Y_1 = cx'_1 + dy'_1 + T_y \\
 P_2 &\Rightarrow X_2 = ax'_2 - by'_2 + T_x; Y_2 = cx'_2 + dy'_2 + T_y \\
 &\cdot \\
 &\cdot \\
 P_n &\Rightarrow X_n = ax'_n - by'_n + T_x; Y_n = cx'_n + dy'_n + T_y
 \end{aligned}$$

Expresado en forma matricial:

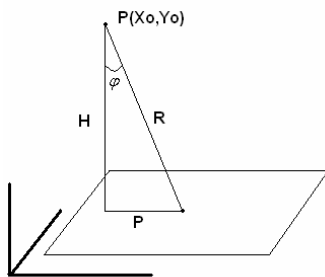
$$\begin{bmatrix}
 x'_1 & y'_1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\
 0 & 0 & x'_1 & y'_1 & 0 & 1 \\
 x'_2 & y'_2 & 0 & 0 & 1 & 0 \\
 0 & 0 & x'_2 & y'_2 & 0 & 1 \\
 \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\
 x'_n & y'_n & 0 & 0 & 1 & 0 \\
 0 & 0 & x'_n & y'_n & 0 & 1
 \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix}
 a \\
 b \\
 c \\
 d \\
 T_x \\
 T_y
 \end{bmatrix}
 -
 \begin{bmatrix}
 X_1 \\
 Y_1 \\
 X_2 \\
 Y_2 \\
 \cdot \\
 X_n \\
 Y_n
 \end{bmatrix}
 =
 \begin{bmatrix}
 V_{x1} \\
 V_{y1} \\
 V_{x2} \\
 V_{y2} \\
 \cdot \\
 V_{xn} \\
 V_{yn}
 \end{bmatrix}$$

Donde las incógnitas se obtienen a partir de la resolución del sistema utilizando metodologías de mínimos cuadrados:

C.2 Cálculo punto de proyección

Para el cálculo del punto de coordenadas del avión se aplica directamente trigonometría espacial. Se conocen las rotaciones angulares sufridas por los ejes ideales orientación del avión, la altura H y parámetros de la cámara fotográfica.

El proceso seguido es el siguiente:



$$H = R \cos(\varphi)$$

$$P = R \sin(\varphi)$$

$$R = \frac{H}{\cos(\varphi)}$$

$$P = \frac{H \sin(\varphi)}{\cos(\varphi)}$$

Fig C.2.1 Proyección punto

Mediante la ecuación de distancia y el conocimiento de coordenadas de avión se desarrolla la matemática del cálculo del punto proyectado.

$$d = R$$

$$d^2 = (x_o - x)^2 + (y_o - y)^2 = R^2$$

$$m = \frac{y_o - y}{x_o - x} = \tan(\varphi)$$

$$\begin{pmatrix} X - X_L \\ Y - Y_L \\ Z - Z_L \end{pmatrix} = \lambda \cdot R \cdot \begin{pmatrix} x - x_o \\ y - y_o \\ -f \end{pmatrix}$$

$$\lambda \cdot \begin{pmatrix} x - x_o \\ y - y_o \\ -f \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} AreaX / 2 \\ AreaY / 2 \\ -H \end{pmatrix}$$

Sustituyendo la pendiente "m" :

$$x_o = \sqrt{R^2 - (((x_o - x) \tan(\varphi) + y) - y)^2} + x;$$

Desarrollando la ecuación:

$$\begin{aligned}
 R^2 &= (1 + \tan^2(\varphi))x_o^2 + (1 + \tan^2(\varphi))x^2 + (-2x - 2x \tan^2(\varphi))x_o \\
 A &= 1 + \tan^2(\varphi) \\
 B &= -2x - 2x \tan^2(\varphi) \\
 C &= 1 + \tan^2(\varphi) \\
 x_o &= \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4A(C - R^2)}}{2A}
 \end{aligned}$$

C.3 Cálculo área de proyección

Partiendo de la ecuación general de la transformación proyectiva bidimensional (3.1.3.21) y conociendo la matriz de rotación:

$$\begin{pmatrix} X - X_L \\ Y - Y_L \\ Z - Z_L \end{pmatrix} = \lambda \cdot R \cdot \begin{pmatrix} x - x_o \\ y - y_o \\ -f \end{pmatrix}$$

$$\lambda \cdot \begin{pmatrix} x - x_o \\ y - y_o \\ -f \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} AreaX / 2 \\ AreaY / 2 \\ -H \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} X - X_L \\ Y - Y_L \\ Z - Z_L \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} AreaX / 2 \\ AreaY / 2 \\ -H \end{pmatrix}$$

Los coeficientes de la matriz de rotación se encuentran en la fórmula (3.1.3.20) Desarrollando las ecuaciones matriciales queda:

$$X = \left(r_{11} \frac{AreaX}{2} + r_{12} \frac{AreaY}{2} - r_{13}H\right) + X_L$$

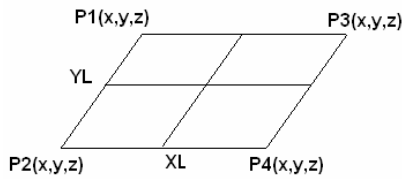
$$Y = \left(r_{21} \frac{AreaX}{2} + r_{22} \frac{AreaY}{2} - r_{23}H\right) + Y_L$$

$$Z = \left(r_{31} \frac{AreaX}{2} + r_{32} \frac{AreaY}{2} - r_{33}H\right) + Z_L$$

$$A = \left(r_{11} \frac{AreaX}{2} + r_{12} \frac{AreaY}{2} - r_{13}H\right)$$

$$B = \left(r_{21} \frac{AreaX}{2} + r_{22} \frac{AreaY}{2} - r_{23}H\right)$$

Se supone que los puntos al ser un plano proyectado, tiene la misma Z. Finalmente los puntos del área de proyección son:



$$P1(X, Y) = P(X_L - A, X_L + B, Z)$$

$$P2(X, Y) = P(X_L - A, X_L - B, Z)$$

$$P3(X, Y) = P(X_L + A, X_L + B, Z)$$

$$P4(X, Y) = P(X_L + A, X_L - B, Z)$$

D. Desarrollos de implementación

D.1 Ejemplo XML misión

```
<MissionPackage>
  <id>12</id>
  <uavPosition latitude="422771" longitude="4606274" altitudemls="300"
  truealtitude="300"/>
  <uavAngles roll="5" pitch="8" yaw="7"/>
  -<info>
    <name>foto1.jpg</name>
    <description>MisionCastell7</description>
    <style>photo</style>
    <filesize>600</filesize>
    -<camera>
      <id>CAM1</id>
      <angles roll="5" pitch="8" yaw="7"/>
      <focuslength>0.1</focuslength>
      <Resx>320</Resx>
      <Resy>240</Resy>
      <CCDx>0.04</CCDx>
      <CCDy>0.03</CCDy>
    </camera>
    -<data>
      <type>preview</type>
      -<path>
        C:\Documents and Settings\CASA\Escritorio\Sky-
        Eye\Sky-Eye\Sky-Eye\XML\Paquetes Mision\foto1.jpg
      </path>
    </data>
  </info>
  <flightTime time="345"/>
  <totalTime time="345"/>
  <missionTime time="54"/>
  <maxTime time="543"/>
</MissionPackage>
```

D.2 Proyección del punto

Método encargado de proyectar los puntos sobre la cartografía. A los puntos de control se le adjudicaron unos sistemas de coordenadas y proyección correspondientes al mapa georeferenciado sobre el cual se pretende visualizar.

```
public void ProyectarPunto(IPoint Corrdenadas, IMapControl2
mapa)
{
    //Se obtiene el contenedor de graficos del mapa
    IGraphicsContainer Contenedor =
mapa.ActiveView.GraphicsContainer;

    //Obtenemos el sistema espacial del mapa (UTM)
    ISpatialReference SpRefMapa =
mapa.ActiveView.FocusMap.SpatialReference;

    //Se obtiene el sistema de coordenadas usado
    por el sistema espacial del mapa (lat/lon)
    ISpatialReference GeoSpataRef;
    IProjectedCoordinateSystem SistProyecion =
SpRefMapa;
    GeoSpataRef =
    SistProyecion.GeographicCoordinateSystem;

    //Se crea el nuevo punto asignandoles las
    coordenadas de proyeccion ya
    calculadas(lat/lon)
    IPoint Pproyec = new PointClass();
    Pproyec.PutCoords(Corrdenadas.X,
Corrdenadas.Y);

    //Se le aplica el sistema espacial donde se
    kiere representar
    Pproyec.SpatialReference = GeoSpataRef;

    //Se proyecta en el sistema spacial de
    referencia del mapa (UTM)
    Pproyec.Project(SpRefMapa);

    //Se introduce en el contenedor de graficos
    del mapa para ser visualizado
    IElement Elemento = new MarkerElementClass();
    Elemento.Geometry = Pproyec;
    Contenedor.AddElement(Elemento, 0);

    //Se refresca el mapa para ver los nuevos
    cambios
    mapa.ActiveView.Refresh();
}
```

D.3 Proyección imagen

Este método se utiliza para proyectar la imagen sobre el mapa una vez se disponga del área de proyección sobre el terreno. Desconociendo en todo momento los puntos de control entre el plano imagen y el plano terrenal.

```
public void
ProyectarRasterConDatoTransformacion(IRasterDataset
rasterDataset, ISpatialReference outSpatial,
esriSRGeoTransformation2Type geoTrans)
{
    IRaster raster = rasterDataset.CreateDefaultRaster();
    IRasterProps rasterProps = (IRasterProps)raster;
    rasterProps.SpatialReference = outSpatial;

    rasterProps.Extent.CenterAt(Nueva_Orto_Jpg.GetSetPuntoCentr
al);

    //Se especifica la geotransformacion
    ISpatialReferenceFactory2 srFactory =
newSpatialReferenceEnvironmentClass();
    IGeoTransformation
geoTransformation=(IGeoTransformation)srFactory.CreateGeoTr
ansformation((int)geoTrans);

    //Se realizan la transformacion del tamaño de celdas y
extent
    IGeoTransformationOperationSet operationSet
=new(GeoTransformationOperationSetClass());

    operationSet.Set(esriTransformDirection.esriTransformForwar
d, geoTransformation);

    operationSet.Set(esriTransformDirection.esriTransformRevers
e, geoTransformation);

    //Se introduce la transformacion en el raster
    IRaster2 raster2 = (IRaster2)raster;
    raster2.GeoTransformations = operationSet;

    //Se guardan los Nuevos resultados
    ISaveAs saveas = (ISaveAs)raster;
    saveas.SaveAs(@"C:\\geotiff_bin\\prueba.img", null,
"IMAGINE Image");
}
```

D.4 Transformar Imagen

Este método se utiliza para transformar la imagen a partir de una transformación polinómica previamente calculada utilizando 6 puntos de control.

```
public void ModificarYguardarNuevoRaster(IRaster2 raster,
IGeodataXform xform)
{
    //se obtiene el extent y el tamaño de la celda del
raster
    IRasterProps rasterProps = (IRasterProps)raster;
    IEnvelope extent = rasterProps.Extent;
    IPnt Tamcelda = rasterProps.MeanCellSize();
    double xCelda = Tamcelda.X;
    double yCelda = Tamcelda.Y;

    //le añadimos el geodataXform
    raster.GeodataXform = xform;
    //se transforma primero el tamaño de la celda, luego
extent.

xform.TransformCellsize(esriTransformDirection.esriTransformF
orward, ref xCelda, ref yCelda, extent);

xform.TransformExtent(esriTransformDirection.esriTransformF
orward, extent);

    rasterProps.Extent = extent;
    rasterProps.Width = (int)(extent.Width / xCelda);
    rasterProps.Height = (int)(extent.Width / yCelda);
    //Se guardan los cambios en un raster nuevo
    ISaveAs saveAs = (ISaveAs)raster;
    saveAs.SaveAs(@"c:\temp\prueba.img", null, "IMAGINE
Image");
}
```