

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

DESARROLLO DE UNA APLICACIÓN DIGITAL PARA LA ORIENTACIÓN DE PARES ESTEREOGRÁFICOS, CON FINES CARTOGRÁFICOS

Presentado ante la ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por la Br.:
García Hernández, María Fernanda
Para optar al Título de
Ingeniero Geodesta

Caracas, 2010

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

DESARROLLO DE UNA APLICACIÓN DIGITAL PARA LA ORIENTACIÓN DE PARES ESTEREOGRÁFICOS, CON FINES CARTOGRÁFICOS

TUTOR ACADÉMICO: Prof. Julián García

COLABORADOR: Prof. Maritza Rivas

Presentado ante la ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por la Br.:
García Hernández, María Fernanda
Para optar al Título de
Ingeniero Geodesta

Caracas, 2010

ACTA

El día _____ se reunió el jurado formado por los profesores

Con el fin de examinar el Trabajo Especial de Grado titulado: “**DESARROLLO DE UNA APLICACIÓN DIGITAL PARA LA ORIENTACIÓN DE PARES ESTEREOGRÁFICOS, CON FINES CARTOGRÁFICOS**”.

Presentado ante la ilustre Universidad Central de Venezuela para optar al título de: **INGENIERO GEODESTA.**

Una vez oída la defensa oral que la bachiller María Fernanda García hizo de su Trabajo Especial de Grado, este jurado decidió las siguientes calificaciones:

NOMBRE	CALIFICACIÓN	
	Número	Letra
Br. María Fernanda García		

RECOMENDACIONES:

FIRMAS DEL JURADO

Caracas, ____ de _____ de 2009

DEDICATORIA

A Dios, por darme la fe, fortaleza, paciencia y salud para culminar con este proyecto y con mi carrera.

A mis padres, por apoyarme a lo largo de todo este tiempo, acompañarme siempre y ayudarme a formarme como la persona que soy.

A mis hermanas, Mariale y Gaby, por siempre estar allí cuando lo he necesitado y soportarme en estos últimos meses.

A mi tutor, el profesor Julián García, por acompañarme en la elaboración de este proyecto y siempre motivándome para culminar el mismo.

A Daniel, por guiarme en la elaboración de la tesis y por entender los momentos cuando no pude estar ahí.

A mis amigos y amigas por entender mi ausencia y apoyarme siempre.

A mis tíos y primos, por ayudarme cuando lo necesite y haberme brindado sus mejores deseos.

AGRADECIMIENTOS

A la ilustre Universidad Central de Venezuela, por acobijarme y permitir cursar mis estudios de pregrado en sus amplios y espectaculares espacios.

Al Prof. Julián García, por haber sido más que un tutor, una guía y un compañero a lo largo de este trabajo.

A mi colaboradora la Prof. Maritza Rivas, por sus eternos regaños para que culminara la tesis.

A todos mis compañeros de Geodesía, en especial a Carlos Vásquez y Moisés Araque.

A mis socios, por apoyarme y entender mi ausencia.

A todos los profesores de Geodesia, por haber compartido sus valiosos conocimientos y experiencias conmigo.

A la secretaria del DIGA, por todo su apoyo incondicional.

García H., María F.

**DESARROLLO DE UNA APLICACIÓN DIGITAL PARA LA
ORIENTACIÓN DE PARES ESTEREOGRÁFICOS, CON FINES
CARTOGRÁFICOS**

Tutor Académico: Prof. Julián García
Trabajo Especial de Grado. Caracas, UCV. Facultad de Ingeniería.
Escuela de Ingeniería Civil. 2010, 184 páginas.

Palabras Clave: Fotogrametría Terrestre, Fotogrametría Arquitectónica, Levantamiento fotogramétrico, Orientación relativa y absoluta.

Resumen

Considerando las grandes transformaciones que se han introducido en el ámbito de la Fotogrametría debido al avance del proceso científico-técnico en las últimas décadas, este proyecto lo que pretende es diseñar una aplicación informática fotogramétrica de bajo coste y de software libre, en la cual se desarrollen los modelos matemáticos fundamentales que permiten realizar las orientaciones analíticas de los modelos fotogramétricos (Relativa y Absoluta). Para ello se evaluaron las distintas metodologías de desarrollo, así como las diversas plataformas digitales de trabajo y se ubicó una estructura indicada para su implementación, que corresponde al Panteón Nacional.

Esta aplicación permite al usuario obtener coordenadas reales de los elementos en estudio, así como los parámetros de rotación y desplazamiento existente entre las imágenes del estereopar adquirido durante el proceso de toma de las mismas (Orientación Relativa).

Para el desarrollo de la aplicación se utilizó el módulo de Visual Basic for Applications® (VBA) en la plataforma de Microstation®, donde se generó el código fuente correspondiente a los modelos matemáticos respectivos del proceso, luego este desarrollo fue implementado en el ambiente de Microstation con el estereopar del Panteón Nacional y con otros valores hallados durante el proceso de documentación,

para comprobar el funcionamiento de la aplicación. De lo descrito anteriormente se concluye que la herramienta diseñada cumple con los objetivos planteados de elaborar las orientaciones relativa y absoluta, bajo tolerancias admisibles, de igual forma resultados que se obtengan se encuentran estrechamente relacionados a la geometría de la toma de las imágenes del estereopar, así como a las condiciones del lente de la cámara que se utiliza para implementar la aplicación.

INDICE

INTRODUCCION	1
Capítulo I FUNDAMENTOS DE LA INVESTIGACIÓN	3
1.1. Planteamiento del Problema	3
1.2. Marco Referencial.	4
1.3. Objetivos.	5
1.3.1. Objetivo General	5
1.3.2. Objetivos Específicos	5
Capítulo II MARCO TEORICO.	6
2.1. La Fotogrametría.	6
2.1.1. Definición.	6
2.1.2. Breve Reseña Histórica de la Fotogrametría.	7
2.1.3. Clasificación de la Fotogrametría.	8
2.1.4. La Fotogrametría Digital	9
2.1.4.1. Definición.	9
2.1.4.2. La Imagen Digital.	10
2.1.5. Aplicaciones.	10
2.2. Cámaras.	11
2.2.1. Definición.	11
2.2.2. Tipos y Elección de Cámaras.	12
2.2.3. Calibración de la Cámara.	20
2.2.3.1. Definición.	20
2.2.3.2. Procedimientos de Calibración	21
2.2.3.3. Calibración de Cámaras No Métricas.	22
2.3. Sistema de Coordenadas Imagen.	24
2.3.1. Mediciones en la Imagen.	24
2.3.2. Escalas para Mediciones Fotogramétricas.	27
2.3.3. Transformación del Sistema Píxel al Sistema de Coordenadas Imagen.	28
2.4. Visión Estereoscópica.	28
2.4.1. Percepción de la Profundidad.	28
2.4.2. El Ojo Humano.	29
2.4.3. Percepción Estereoscópica de la Profundidad.	30
2.4.4. Observación de Imágenes Estereoscópicamente.	31

2.4.5. Estereoscopios.	34
2.4.6. Principios de la Marca Flotante	36
2.4.7. Paralaje Estereoscópico.	37
2.5. Fotogrametría Analítica.	39
2.5.1. Mediciones en la Imagen.	39
2.5.2. Puntos de Control	39
2.5.3. Condición de Coplaneidad.	40
2.5.4. Orientación Relativa.	42
2.5.5. Orientación Absoluta.	43
2.6. La Fotogrametría Terrestre.	46
2.6.1. Definición.	46
2.6.2. Antecedentes de la Fotogrametría Terrestre y la Fotogrametría Arquitectónica.	46
2.6.3. Objetivo de la Fotogrametría Analítica en el Marco de la Fotogrametría Terrestre	47
2.7. Breve Descripción de las Herramientas empleadas en el desarrollo del Trabajo Especial de Grado.	49
2.7.1. Photomodeler®	49
2.7.1.1. Calibración de la Cámara en Photomodeler®	49
2.7.2. Microstation V8®.	50
2.7.3. Visual Basic®.	51
2.8. Aplicación de la Herramienta para el estudio del Patrimonio Cultural.	53
2.8.1. Definición de Patrimonio Cultural.	54
2.8.2. Panteón Nacional.	56
Capítulo III MÉTODO	58
3.1. Proceso de Documentación.	59
3.1.1. Búsqueda de Información Bibliográfica.	59
3.1.2. Establecimiento de los Requerimientos.	59
3.1.3. Evaluación de las Diferentes Plataformas.	60
3.1.4. Aprendizaje en el Uso de la Plataforma.	62
3.2. Levantamiento de Información.	62
3.2.1. Elección de la Estructura a levantar.	63
3.2.2. Toma de las Imágenes.	64
3.2.3. Levantamiento Topográfico.	66
3.3. Logística y Preparación.	68

3.3.1. Establecimiento del Método a Utilizar.	68
3.3.2. Identificación de las Fórmulas	69
<input type="checkbox"/> Orientación Relativa.	74
<input type="checkbox"/> Orientación Absoluta.	78
3.3.3. Desarrollo de Procedimientos en Excel®.	85
3.3.4. Calibración de la Cámara.	88
3.4. Diseño Conceptual de la Aplicación	94
3.4.1. Análisis del Problema.	94
3.4.2. Diseño de Algoritmos de la Aplicación.	96
3.5. Diseño Lógico de la Aplicación	98
3.5.1. Elaboración del Diagrama de Flujo.	98
3.6. Diseño Físico de la Aplicación.	102
3.6.1. Codificación del Diagrama de Flujo.	102
3.6.2. Prueba y Depuración.	102
3.6.3. Implementación de la Aplicación.	103
3.6.4. Elaboración del Manual de Usuario.	104
Capítulo IV Resultados y análisis	105
4.1. Documentación: Adquisición de Información Bibliográfica.	105
4.2. Levantamiento de Información.	106
4.2.1. Toma de Imágenes.	106
4.2.2. Levantamiento Topográfico.	109
4.3. Logística y Preparación.	111
4.3.1. Desarrollo de los procedimientos en la Herramienta Excel.	111
4.3.2. Calibración de la Cámara.	125
4.4. Diseño Físico de la Aplicación.	128
4.4.1. Codificación del Diagrama de Flujo.	129
4.4.2. Implementación de la Aplicación.	148
Capítulo V . Conclusiones y recomendaciones	163
5.1. Conclusiones	163
5.2. Recomendaciones	165
BIBLIOGRAFÍA	166
ANEXOS	168

LISTA DE ILUSTRACIONES Y CÓDIGOS DE PROGRAMACIÓN

<i>Figura 1. Cámara Aérea Métrica, Leica RC30</i>	13
<i>Figura 2. Cámara Terrestre Métrica, Universal Wild P31</i>	13
<i>Figura 3: Cámara No Métrica Nikon D90</i>	16
<i>Figura 4: Esquema de Cámara Fotogramétrica Aérea</i>	17
<i>Figura 5. Cámara Terrestre Métrica.</i>	18
<i>Figura 6. Cámara Analógica Nikon F3</i>	18
<i>Figura 7: Sensor CCD KAF-16801E de 4096 × 4096 pixeles, tamaño de 36,88 × 36,88 mm.</i>	19
<i>Figura 8: Mediciones de Puntos para el establecimiento de las marcas fiduciales virtuales en un negativo de 35mm de película.</i>	23
<i>Figura 9: Geometría de una Cámara Digital.</i>	24
<i>Figura 10: Sistema de Coordenadas Fotográfico basado en las Marcas Fiduciales</i>	25
<i>Figura 11: El Sistema Cartesiano 3-D de coordenadas imagen</i>	26
<i>Figura 12: Coordenadas de la Imagen Digital</i>	27
<i>Figura 13: Sección Transversal del Ojo Humano.</i>	30
<i>Figura 14: Percepción Estereoscópica de la Profundidad en función del Ángulo de Paralaje</i>	30
<i>Figura 15: La Profundidad Aparente del Objeto puede ser Modificada, cambiando la Separación de las Imágenes.</i>	32
<i>Figura 16: Fotografías de dos estaciones de toma que poseen un edificio como objeto común.</i>	33
<i>Figura 17: Observación Estereoscópica del Edificio.</i>	34
<i>Figura 18: Estereoscopio de Espejos.</i>	35
<i>Figura 19: Principio de Funcionamiento del Estereoscopio de Espejos.</i>	36
<i>Figura 20. Esquema de la Marca Flotante</i>	36
<i>Figura 21. Relación entre Paralaje y Altura en la Marca Flotante.</i>	37
<i>Figura 22. Geometría General de Fotografías Consecutivas.</i>	38
<i>Figura 23. Superposición de Fotografías Consecutivas.</i>	38
<i>Figura 24: Condición de Coplaneidad.</i>	40
<i>Figura 25: Sistema con origen en el Centro de Proyección Izquierdo.</i>	41
<i>Figura 26. Sistema Tridimensional de Referencia y Arbitrario.</i>	44
<i>Figura 27. Definición de las rotaciones sobre cada uno de los ejes del sistema tridimensional.</i>	45
<i>Figura 28. Iglesia de la Santísima Trinidad</i>	57
<i>Figura 29. Panteón Nacional de José Gregorio Zolano.</i>	57
<i>Esquema 1. Etapas del Método</i>	58
<i>Figura 30. Imagen del Panteón Nacional</i>	63
<i>Figura 31. Calculo de la base x para la toma del par estereoscópico</i>	65

Figura 32. Croquis de los Puntos de Toma _____	66
Figura 33. Croquis de los puntos medidos sobre la zona central de la estructura _____	67
Figura 34. Croquis de los puntos medidos sobre la zona izquierda de la estructura _____	67
Figura 35. Croquis de los puntos medidos sobre la zona derecha de la estructura. _____	68
Figura 36: Orientación Relativa por Empalme de Fotos Consecutivas. _____	75
Figura 37: Componentes de la Base. _____	77
Figura 38: Cálculo de Coordenadas Modelo. _____	77
Figura 39: Cálculo Aproximado del Giro Acimutal. _____	82
Figura 41. Desarrollo del Cálculo de Coordenadas Modelo en Excel. _____	87
Figura 42. Desarrollo de la Orientación Absoluta en Excel. _____	87
Figura 43. Cuadro para seleccionar el proyecto a realizar. _____	92
Figura 44. Cuadro de selección de imágenes. _____	92
Figura 45. Cuadro de Calibración Automática de la cámara. _____	93
Figura 46. Proceso de Calibración. _____	93
Figura 47. Reporte Final obtenido luego de la calibración automática. _____	94
Esquema 2. Algoritmo Inicial para el desarrollo de la Aplicación _____	97
Esquema 3. Algoritmo Final para el desarrollo de la Aplicación _____	98
Diagrama 1. Esquema principal del Programa _____	99
Diagrama 2. Proceso de Orientación Relativa. _____	100
Diagrama 3. Presentación de Resultados e Implementación de la Herramienta. _____	101
Figura 48. Imagen del Panteón Nacional tomada desde la Estación Derecha. _____	107
Figura 49. Imagen del Panteón Nacional tomada desde la Estación Izquierda. _____	108
Tabla 43. Precisiones de los Puntos _____	126
Figura 50. Estructura de la Aplicación. _____	129
Figura 51. Formulario para el inicio de la aplicación. _____	130
Código 1. Inicio de la Aplicación _____	130
Figura 52. Formulario para la carga de imágenes del estereopar. _____	131
Código 2. Inserción de imágenes al ambiente de Microstation®. _____	132
Figura 53. Formulario del Menú Principal del Programa _____	133
Código 3. Declaración de Variables del Formulario del Menú Principal. _____	133
Código 4. Inicialización de variables del Formulario del Menú Principal. _____	134
Código 5. Iteraciones realizadas durante la Orientación Relativa. _____	135
Código 6. Aplicación de las Rotaciones a la Imagen Derecha. _____	136
Figura 54. Formulario para Recolectar Puntos desde un Archivo. _____	136
Código 7. Adquisición de Matriz de Datos desde un archivo y almacenarla. _____	137
Figura 55. Formulario para la Captura de Puntos desde la Imagen. _____	138
Código 8. Captura de Puntos desde las Imágenes cargadas en Microstation. _____	139

Código 9. Almacenar la Matriz Datos en la Aplicación y en un archivo de datos _____	140
Código 10. Inicio de la Aplicación _____	141
Código 11. Cálculo de la Matriz de Rotación. _____	141
Código 12. Cálculo de las Matrices de Coeficientes A, B y Delta(X). _____	142
Código 13. Cálculo de la Matriz transpuesta B. _____	143
Código 14. Cálculo de la Matriz B transpuesta multiplicada por B y por Delta (X). _____	143
Código 15. Declaración de variables del módulo para calcular la matriz inversa _____	144
Código 16. Cálculo del Determinante de la Matriz $B^t \times B$ para calcular la matriz inversa _____	144
Código 17. Cálculo de la matriz inversa $B^t \times B$. _____	145
Código 18. Cálculo de Nuevos Valores Iniciales _____	146
Código 19. Cálculo de la Matriz Datos Nueva. _____	146
Figura 56. Inicio de la Aplicación. _____	148
Figura 57. Selección de Actividad a Realizar: Cargar Imágenes. _ ¡Error! Marcador no definido.	
Figura 58. Creación de Marcos o Bloques durante la carga de imágenes. _____	149
Figura 59. Seleccionar la opción para cargar imágenes, luego de obtener los marcos. _____	149
Figura 60. Inserción de la Imagen Derecha. _____	150
Figura 61. Inserción de la Imagen Izquierda. _____	150
Figura 62. Selección del modo de recolección de datos. _____	151
Figura 63. Recolección de Datos a través de puntos sobre las imágenes. _____	151
Figura 64. Marcación y almacenaje de puntos ubicados en las imágenes. _____	152
Figura 65. Introducción de Valores Iniciales para la Orientación Relativa. _____	152
Figura 66. Ejecución de la Orientación Relativa. _____	153
Figura 67. Producto final obtenido luego de rotar la imagen derecha según los valores hallados en la Orientación Relativa. _____	153

LISTA DE TABLAS

<i>Tabla 1. Características de la cámara Nikon D90</i>	15
<i>Tabla 2. Comparación de las Posibles Plataformas de Trabajo</i>	61
<i>Tabla 3: Coordenadas Ejemplo para el Desarrollo de la O. Relativa en Excel.</i>	85
<i>Tabla 4. Coordenadas Ejemplo para el Desarrollo de la O. Absoluta en Excel.</i>	86
<i>Tabla 5. Imágenes para la Calibración de la cámara.</i>	91
<i>Tabla 6. Coordenadas de puntos medidos sobre la estructura del Panteón.</i>	109
<i>Tabla 7. Diferencias de Coordenadas de los mismos puntos en estaciones diferentes</i>	110
<i>Tabla 8. Valores Iniciales O. Relativa.</i>	112
<i>Tabla 9. Matriz de Diferenciales, Primera Iteración O. Relativa</i>	112
<i>Tabla 10. Nuevos Valores Iniciales, Primera Iteración O. Relativa</i>	113
<i>Tabla 11. Matriz de Rotación, Primera Iteración O. Relativa</i>	113
<i>Tabla 12. Nueva Matriz de Datos, Primera Iteración O. Relativa</i>	113
<i>Tabla 13 Matriz de Diferenciales, Segunda Iteración O. Relativa</i>	114
<i>Tabla 14. Nuevos Valores Iniciales, Segunda Iteración O. Relativa</i>	114
<i>Tabla 15. Matriz de Rotación, Segunda Iteración O. Relativa</i>	114
<i>Tabla 16. Nueva Matriz de Datos, Segunda Iteración O. Relativa</i>	115
<i>Tabla 17 Matriz de Diferenciales, Tercera Iteración O. Relativa</i>	115
<i>Tabla 18. Nuevos Valores Iniciales, Tercera Iteración O. Relativa</i>	115
<i>Tabla 19. Matriz de Rotación, Tercera Iteración O. Relativa</i>	116
<i>Tabla 20. Nueva Matriz de Datos, Tercera Iteración O. Relativa</i>	116
<i>Tabla 21. Matriz de Diferenciales, Cuarta Iteración O. Relativa</i>	116
<i>Tabla 22. Nuevos Valores Iniciales, Cuarta Iteración O. Relativa</i>	117
<i>Tabla 23. Matriz de Rotación, Cuarta Iteración O. Relativa</i>	117
<i>Tabla 24. Nueva Matriz de Datos, Cuarta Iteración O. Relativa</i>	117
<i>Tabla 25. Matriz de Diferenciales, Quinta Iteración O. Relativa</i>	118
<i>Tabla 26. Nuevos Valores Iniciales, Quinta Iteración O. Relativa</i>	118
<i>Tabla 27. Matriz de Rotación, Primera Iteración O. Relativa</i>	118
<i>Tabla 28. Nueva Matriz de Datos, Quinta Iteración O. Relativa</i>	119
<i>Tabla 29. Resultados Obtenidos de la Orientación Relativa.</i>	121
<i>Tabla 30. Valores de la base z y la base y del ejemplo desarrollado en Excel.</i>	121
<i>Tabla 31. Coordenadas del Modelo del ejemplo desarrollado en Excel.</i>	121
<i>Tabla 32. Parámetros de Orientación Absoluta de la Primera Iteración.</i>	123
<i>Tabla 33 Parámetros de Orientación Absoluta de la Segunda Iteración.</i>	123
<i>Tabla 34 Parámetros de Orientación Absoluta de la Tercera Iteración.</i>	123

<i>Tabla 35. Valores de Orientación Absoluta para el Punto nº 1.</i>	<u>124</u>
<i>Tabla 36. Valores de Orientación Absoluta para el Punto nº 2.</i>	<u>124</u>
<i>Tabla 37. Valores de Orientación Absoluta para el Punto nº 3.</i>	<u>124</u>
<i>Tabla 38. Valores de Orientación Absoluta para el Punto nº 4.</i>	<u>124</u>
<i>Tabla 39. Error Total de la Calibración</i>	<u>125</u>
<i>Tabla 40. Precisiones/ Desviaciones Estándar de la Calibración de la Cámara.</i>	<u>126</u>
<i>Tabla 41. Residuales de las Marcas de los puntos.</i>	<u>126</u>
<i>Tabla 42. Ajuste de puntos.</i>	<u>126</u>
<i>Tabla 43. Precisiones de los Puntos</i>	<u>126</u>
<i>Tabla 44. Datos de formato fotográfico utilizado.</i>	<u>128</u>

INTRODUCCION

Hoy en día con los nuevos avances tecnológicos se han impuesto grandes transformaciones en el campo de la informática, el computador se ha convertido en una herramienta indispensable permitiendo así la evolución e innovación de diversos campos de investigación.

Estos profundos cambios no han pasado desapercibidos para la Fotogrametría, que a través de la informática ha desarrollado su enfoque digital, lo que ha permitido relacionar a ésta con otras disciplinas como la Teledetección, el Tratamiento de Imágenes, la Robótica, etc., así como la aparición del nuevo concepto de instrumento de restitución digital, cuyos componentes son el conjunto de programas (*software*) y el *hardware*. Este panorama ha traído como consecuencia la creación de nuevas, y en la mayoría de los casos, costosas herramientas de trabajo e instrumentos de la disciplina.

El objetivo de este Trabajo Especial de Grado consiste en aprovechar estas nuevas tecnologías para desarrollar una aplicación que, sustentada en otra ya existente, permita realizar de manera práctica la visualización de imágenes digitales, la captura de datos fotogramétricos, el procesamiento de los mismos y su aplicación a la cartografía u otras disciplinas y que a su vez sea un software libre.

En este sentido se presenta la metodología y contenidos teóricos utilizados para la creación de una herramienta que permita realizar las Orientaciones Relativa y Absoluta de un par estereoscópico y que a su vez esta sea implementada sobre un programa denominado Microstation, que permita la visualización de imágenes digitales así como el desarrollo cartográfico en base a éstas.

Para el diseño de la aplicación fue necesario investigar sobre las distintas tecnologías existentes que desempeñen las funciones deseadas, las bases teóricas que fundamenten los procedimientos necesarios para la elaboración de la herramienta y analizar de qué manera poner en práctica la herramienta.

Dentro del marco de la Conservación del Patrimonio Cultural, resultó interesante que la puesta en práctica se realizará sobre imágenes de un elemento Patrimonial de Venezuela, en este caso como lo es el Panteón Nacional.

El Trabajo Especial de Grado posee la siguiente estructura:

Capítulo I: Fundamentos de la Investigación.

Capítulo II: Marco Teórico.

Capítulo III: Método

Capítulo IV: Resultados y Análisis

Capítulo V: Conclusiones y Recomendaciones.

CAPÍTULO I FUNDAMENTOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. Planteamiento del Problema

En el área de la Fotogrametría, actualmente no se cuenta con herramientas digitales que estén dirigidas esencialmente al tratamiento de las orientaciones absolutas y relativas de un estereopar, ciertamente si existen programas que realizan esto pero los costos son excesivamente altos. Las orientaciones de estereopares se realizan con programas que impiden la modificación digital de parámetros durante el procesamiento, lo que, en muchas ocasiones entorpece el análisis, estos programas son lo que generalmente se conoce como una caja negra.

Ante esta problemática, surge la necesidad de crear un programa que permita elaborar exclusivamente las orientaciones de un modelo fotogramétrico, de manera tal que sea posible modificar los valores durante el procesamiento, y a su vez mediante el uso de un estereoscopio de espejos, que facilite la elaboración de las orientaciones relativas y absolutas. Este programa debe poder realizar la Orientación Absoluta al inicio del mismo, permitiendo así procesar el resto de la información durante la Orientación Relativa en coordenadas reales, evitando así hacer el cálculo de coordenadas modelo, hecho que aumenta la precisión de trabajo .

Para poder comprobar que la aplicación desarrollada funcione correctamente, se debe realizar sobre algún estereopar los procesos que se hayan diseñado, ya que el Departamento de Ingeniería Geodésica y Agrimensura de la Universidad Central de Venezuela ha venido trabajando dentro del marco de la importancia que tiene la Conservación de los bienes patrimoniales de la Nación, la estructura elegida corresponde al Panteón Nacional, por su valor patrimonial para la Nación y por muchas modificaciones que ha sufrido a lo largo de los años sin haber sido documentadas, con este tipo de levantamientos.

El Panteón Nacional fue erigido a fines del siglo XVIII como modesta iglesia de la orden de los Hermanos Trinitarios, se convirtió en Panteón Nacional en

1875, bajo el gobierno de Guzmán Blanco. En él reposan los restos de los más ilustres venezolanos, entre ellos, los de El Libertador Simón Bolívar. El Panteón, además de ser el mausoleo de la patria, contiene importantes obras de arte. Por ser ésta una edificación que data de tantos años y por poseer restos de importantes próceres de la Nación, el Panteón es considerado Patrimonio Cultural Venezolano.

1.2. Marco Referencial.

En la actualidad, con la gran cantidad de avances tecnológicos e informáticos, la Universidad Central de Venezuela, específicamente el Departamento de Ingeniería Geodésica y Agrimensura (DIGA) ha venido generando una corriente para que los alumnos desarrollen innovadores Trabajos en el área de la Fotogrametría Digital, aunado a esto, desde el año 2004 han venido trabajando con el Laboratorio de Fotogrametría Arquitectónica de Bari (Italia) para aplicar estos nuevos productos a la Conservación del Patrimonio Cultural, con la finalidad de registrar, levantar y divulgar los elementos de carácter patrimonial, para su conservación en el tiempo.

Ante este panorama, los profesores de la cátedra de Fotogrametría motivan a los estudiantes para desarrollar nuevas tecnologías que mejoren y faciliten el tratamiento digital de imágenes, no solo para los fines antes nombrados sino para diversas aplicaciones. Se han venido desarrollando diversos trabajos en esta área como lo son: La Creación de una Plataforma de Sistema de Información para la Divulgación del Patrimonio de la UCV por el Br. Leopoldo Atencio (2009), Metodología para el Levantamiento Fotogramétrico de Estructuras Arquitectónicas por el Br. Luis Briceño (2009), entre muchos otros, los cuales han sido desarrollados en el DIGA.

El profesor y tutor de este proyecto, el Ing. Julián García planteó un proyecto para elaborar una herramienta que fuera capaz de llevar a cabo los diversos procesos que conforman el área de Fotogrametría, ya que los programas existentes suelen ser muy costosos y en ocasiones no poseen todas las

herramientas que el usuario desearía. Por esta razón, se lleva a cabo con este proyecto, una de las diversas aplicaciones que podrían desarrollarse en base a esta iniciativa.

1.3. Objetivos.

1.3.1. Objetivo General

Elaborar las rutinas de programación necesarias para la realización de las orientaciones relativas y absolutas, con el fin de obtener las coordenadas tridimensionales de puntos de una estructura con elementos arquitectónicos, a partir de un par estereoscópico.

1.3.2. Objetivos Específicos

1. Realizar el levantamiento de control topográfico para la toma de vistas del par estereoscópico.
2. Obtener las vistas del par estereoscópico de la estructura a levantar.
3. Obtener la orientación relativa y absoluta del estereopar,
4. Capturar las coordenadas tridimensionales de puntos en el modelo, con la herramienta desarrollada.
5. Alcanzar las precisiones esperadas.

CAPÍTULO II MARCO TEORICO.

2.1. La Fotogrametría.

2.1.1. Definición.

Según la Sociedad Americana de Fotogrametría y Sensores Remotos (ASPRS), la Fotogrametría se define como:

“...arte, ciencia, y tecnología de obtener información confiable sobre objetos físicos y el medio ambiente a través de procesos de registro, medición e interpretación de imágenes fotográficas y patrones de registro de energía electromagnética radiante y otros fenómenos.”

Según la Sociedad Internacional de Fotogrametría y Sensores Remotos (ISPRS) la Fotogrametría se define como:

“...la ciencia de realizar mediciones e interpretaciones confiables por medio de las fotografías, para de esa manera obtener características métricas y geométricas (dimensión, forma y posición), del objeto fotografiado.”

Como su nombre lo implica, originalmente la ciencia consiste en el análisis de imágenes fotográficas, aunque la fotogrametría hoy en día ha expandido sus áreas de estudio a fotografías digitales, patrones de energía de radiación acústica, mediciones realizadas con láser y fenómenos magnéticos. En este Trabajo Especial de Grado se dedicó el estudio únicamente al análisis de imágenes digitales.

El carácter de las mediciones fotogramétricas puede ser de tipo cuantitativo, como lo es la fotogrametría pura y cualitativo, como lo es la fotointerpretación, en este caso está dirigido meramente a la parte cuantitativa de la fotogrametría.

2.1.2. Breve Reseña Histórica de la Fotogrametría.

La fotogrametría es una disciplina resultado de la convergencia de la óptica, la fotografía, las matemáticas (especialmente la geometría proyectiva), para realizar levantamientos de carácter cartográfico principalmente. Por ello podemos iniciar sus raíces en la óptica, la primera de estas ciencias que tuvo un desarrollo práctico y cuyo aporte es fundamental, tanto en la captura de imágenes, como en su posterior reconstrucción, y cuyo desarrollo teórico y práctico permitió la popularización, por parte de los pintores, de la cámara oscura, la cual constituye la base de la cámara fotográfica. De hecho, en el siglo XVIII había alcanzado tal popularidad, que eran fabricadas casi en serie, adaptadas a los usos y circunstancias. Así pues, cuando aparecieron las primeras emulsiones fotográficas, ya contaban con un aparato relativamente perfeccionado donde podían ser colocadas para captar la luz. Paralelamente, los métodos matemáticos para realizar el alzado de objetos utilizando perspectivas, también habían sido desarrollados para el momento de la aparición de la fotografía, por lo que la utilización de la misma para el trazado de planos, fue inmediatamente puesto en práctica, con resultados satisfactorios. La utilidad comprobada de la fotografía, para trabajos topográficos, estimuló el desarrollo de técnicas conducentes a mejorar las aplicaciones de la fotogrametría, la cual rápidamente se desplazó hacia una nueva plataforma de toma: las aeronaves.

El surgimiento de la aeronáutica, con el advenimiento de los aeróstatos, es contemporáneo con el de la fotografía por lo que la ventaja de la perspectiva aérea fue notada y aplicada de inmediato. La primera guerra mundial puso en manos de los fotogrametristas abundantes recursos económicos que permitieron consolidar la fotogrametría aérea. También en esa guerra apareció una disciplina colateral a la fotogrametría, con un inmenso campo de aplicación: la fotointerpretación.

El desarrollo de las técnicas fotogramétricas continuó en forma progresiva, hasta que el desarrollo de las computadoras y de la fotografía digital, iniciado a partir de los años 70, le dio un nuevo y poderoso impulso a esta disciplina,

arribando de esta manera al estado actual de la fotogrametría, una poderosa tecnología con un alto grado de sofisticación. En forma paralela al progreso de las técnicas fotogramétricas, se desarrollaron las astronáuticas, permitiendo el acceso de la fotogrametría espacial, mediante sensores instalados a bordo de satélites. De esta manera, la Luna y Marte ya han sido mapeados mediante imágenes tomadas por estos satélites, y actualmente parte de los productos fotogramétricos provienen de imágenes tomadas desde el espacio.

La fotogrametría en Venezuela se inició tardíamente, cuando se la creó el Servicio Aerofotográfico en 1935, el cual fue transformado en 1939 en Servicio Cartográfico Nacional. A partir de ese momento, empezó la realización de mapas topográficos con diferentes escalas y con una proyección cónica secante, pasando en 1962 a la proyección UTM, que es la usada hoy en día.

2.1.3. Clasificación de la Fotogrametría.

Según el Autor Luis Jauregui, en su guía de Introducción a la Fotogrametría, se pueden encontrar tres grandes grupos dentro de la fotogrametría, los cuales son:

- **Fotogrametría Aérea:** Es aquella que utiliza fotografías tomadas desde una cámara aerotransportada. Este hecho implica que su eje óptico casi siempre es vertical, y que su posición en el espacio no está determinada. Generalmente, las cámaras usadas son de formato 23 × 23 cm, ya que son las más apropiadas para los trabajos cartográficos a los cuales está destinada. Actualmente cobra importancia la fotografía aérea de pequeño formato, debido a sus ventajas de accesibilidad económica. Otra modalidad que gana importancia la constituye la fotogrametría espacial, que utiliza imágenes estereoscópicas tomadas desde satélites de observación de la tierra.
- **Fotogrametría Terrestre:** Es aquella que utiliza fotografías tomadas sobre un soporte terrestre; debido a esto, la posición y los elementos de orientación externa de la cámara son conocidos de antemano. Si bien

fue la primera aplicación práctica de la fotogrametría, actualmente se usa principalmente en labores de apoyo a la arquitectura, arqueología, ingeniería estructural y en levantamientos topográficos de terrenos muy escarpados. Algunos autores ubican a los usos de la fotogrametría en arquitectura y arqueología en la división de objetos cercanos; sin embargo, cuando los objetos a levantar se vinculan con su posición sobre el terreno, se realiza una actividad de carácter topográfico; por ello, pueden ser ubicadas en esta división.

Este Trabajo Especial de Grado se desarrolla en el grupo anteriormente descrito, con aplicación en el área de la arquitectura.

- **Fotogrametría de objetos cercanos:** En forma general, agrupa aquellas aplicaciones que no tienen carácter geodésico o topográfico. Se aplica para resolver problemas singulares, muy específicos. Por ello se puede decir que son soluciones a la medida del problema a resolver. Esta división es la que abarca la mayor amplitud de técnicas para la toma de fotografías y su posterior restitución.

2.1.4. La Fotogrametría Digital

2.1.4.1. Definición.

La fotogrametría digital, actualmente en auge, surge como consecuencia del gran desarrollo de la computación, que permitió realizar todos los procesos fotogramétricos mediante el uso de computadores. Con la fotogrametría digital crecen las posibilidades de explotación de las imágenes, a la vez que se simplifican las tecnologías, permitiendo con ello la generación automática de modelos de elevación del terreno, ortoimágenes y estereortoimágenes, generación y visualización de modelos tridimensionales etc. Para llevar a cabo la restitución digital, las imágenes digitales son ingresadas en el computador, y mediante visualización en pantalla de las mismas, el operador ingresa los puntos necesarios para realizar el proceso

de orientación en forma matemática. La restitución puede ser un proceso iterativo con el operador o ser realizada en forma automática por correlación de imágenes. La salida en la fotogrametría digital puede ser en formato raster o formato vectorial. (Jauregui, Web del Profesor/ULA/Nociones de Fotogrametría Digital, 2005).

2.1.4.2. La Imagen Digital.

La imagen digital es un arreglo de números enteros (denominados comúnmente como píxeles) cuya posición dentro del arreglo está asociada a una posición geométrica del escenario representado, ordenados en forma matricial. El origen de coordenadas (filas y columnas) se encuentra en la parte superior izquierda.

A cada valor del arreglo, es decir, a cada píxel, se le asocia un tono de gris correspondiente al nivel de intensidad promedio reflejada por el escenario original. Este tono está dado por valores binarios, cuya forma es 2^n .

2.1.5. Aplicaciones.

La Fotogrametría, a significado para la Cartografía del último siglo, una de sus principales herramientas, que junto con la Topografía han posibilitando de manera eficaz al mejor conocimiento de nuestro planeta, contribuyendo de este modo en el desarrollo de muchas disciplinas englobadas en lo que denominamos Ciencias de la Tierra. Pero no es solamente en este campo donde la Fotogrametría ha intervenido.

Los ensayos llevados a cabo hacia la mitad del siglo IXX para el registro de monumentos por medio de fotogramas, pueden considerarse el comienzo de la Fotogrametría. Sin embargo, el nuevo sistema de medición no alcanzó importancia práctica hasta principios del siglo 20, donde esta técnica irrumpió con éxito en la confección de mapas topográficos, siendo luego asumida esta tarea por la Fotogrametría Aérea. Sin embargo el método de fotogrametría

terrestre se impuso en muchos otros campos de aplicación, dando origen a lo que se denomina Fotogrametría Cercana. Algunas de estas aplicaciones son utilizadas en la Arquitectura, en la Ingeniería Civil, en la Hidráulica, en Arqueología, Criminología, Zoología, etc.

Estos son algunos de los ejemplos en los que de manera continua pueden ir a niveles y escalas, desde la estructura molecular a los inmensos sistemas estelares. Por otra parte, no podemos dejar de mencionar (como sucedió en muchas otras ciencias), la aparición de las computadoras y su continuo avance, posibilitaron el desarrollo y utilización de la Fotogrametría Analítica en la última parte del siglo 20, y nos permitirá hacer uso de una manera cada vez más fácil y sencilla de la nueva Fotogrametría Digital.

Posiblemente debido a esto último, sea difícil seguir hablando de aquí en adelante de Fotogrametría o cualquiera de sus Ciencias Afines, sin nombrar a la computadora o dejar de referirnos a la aplicación de alguna técnica informática para llevar a cabo un trabajo en alguna de estas disciplinas. Solo con pronunciar el vocablo Geoinformática, estamos describiendo la situación actual en la que todas las Ciencias de la Tierra, ya sean para una explotación métrica o temática, son cada vez mas afines a las tecnologías computacionales. Pero no debemos confundirnos; las computadoras seguirán siendo una de las herramientas utilizadas en cualquiera de estas ciencias, pero deberán seguirse nutriendo de las metodologías propias que se vayan gestando dentro las mismas.

2.2. Cámaras.

2.2.1. Definición.

Probablemente el dispositivo más fundamental en el campo de la fotogrametría es la cámara. Es el instrumento básico en la adquisición de imágenes, a partir de los cuales los productos fotogramétricos son producidos.

La cámara puede ser definida como:

“... una cámara a prueba de luz o una caja en donde la imagen de un objeto exterior es proyectada sobre una placa sensibilizada o película, a través de una apertura, usualmente equipada con un lente o lentes, un obturador y un variador de apertura.” (American Society of Photogrammetry, 1980)

Esta definición se ha expandido en los últimos años, debido al advenimiento de la cámara digital, que detecta la energía de la luz a través del uso de la electrónica de semiconductores en vez de la película. Cualquiera que sea el dispositivo que se utilice, ya sea digital o analógico, lo importante es conocer la geometría subyacente, la cual es esencial para aplicaciones fotogramétricas precisas y exactas. (Wolf & Dewitt, 2000)

El éxito y notable progreso de la fotogrametría en los últimos años, se debe en gran parte al desarrollo de cámaras cada día más precisas, a la perfección de los lentes que se emplean y en general a las mejoras de construcción y operación de las mismas, lo que ha aumentado las precisiones fotogramétricas.

2.2.2. Tipos y Elección de Cámaras.

Existe una gran diversidad de cámaras y éstas se pueden dividir y agrupar de diferentes maneras, por esta razón, en este trabajo clasificaremos las cámaras en tres grupos, los cuáles son los siguientes:

- Según la exactitud de los resultados las cámaras pueden ser:
 - Cámaras Métricas: son cámaras fotográficas cuyos elementos de orientación interior son conocidos y cuya calidad geométrica es tal, que se puede considerar como una proyección central ideal. Como consecuencia de esta calidad geométrica, este tipo de cámaras debe tener foco fijo, ya que cualquier variación en el enfoque haría variar el ángulo de apertura “ α ”. (Jauregui, Web del Profesor/ULA/Cámara Fotogramétrica, 2005).

El término de cámara métrica, como se emplea en esta definición, incluye a todas aquellas cámaras que son fabricadas

para fines fotogramétricos. Estas cámaras poseen Marcas Fiduciales en su plano focal, o arreglos de CCD (Charged Coupled Device) calibrados, como ocurre en el caso de cámaras digitales, que permiten realizar una reconstrucción precisa de los puntos principales de toma.

Este tipo de cámaras son construidas de manera estable y completamente calibradas antes de su uso. Sus valores de calibración, como la distancia focal, las coordenadas de los puntos principales y la distorsión del lente, se pueden aplicar con confianza durante largos períodos. (Wolf & Dewitt, 2000)

Pueden ser utilizadas tanto para levantamientos aéreos como terrestres, teniendo en cuenta que no se emplean las mismas para los diferentes casos, es decir, poseen básicamente las mismas características, mas los equipos no son los mismos.



Figura 1. Cámara Aérea Métrica, Leica RC30 (Leica)



Figura 2. Cámara Terrestre Métrica, Universal Wild P31

- Cámaras No Métricas: son aquellas cámaras que se fabrican para la fotografía de aficionados o profesionales, donde la calidad pictórica es importante, pero los requisitos de precisión geométrica generalmente no son consideradas de primordial importancia. Estas cámaras no contienen marcas fiduciales, pero pueden ser modificadas para poseer esta característica. (Wolf & Dewitt, 2000)

Las cámaras No Métricas pueden ser calibradas y usadas, obteniendo resultados satisfactorios para aplicaciones fotogramétricas terrestres. Evidentemente, los resultados obtenidos con una cámara métrica serán más precisos que los obtenidos con ésta.

En este Trabajo Especial de Grado la cámara empleada es una no métrica, marca *Nikon®*, modelo D90, la cual es una cámara Réflex Profesional, algunas de sus características son las siguientes:

IMAGEN	
Megapixels	12.9
Resolución Max	4288 x 2848
Otras Resoluciones	3216 x 2136, 2144 x 1424
Ratio de la imagen w:h	3:2
Tipo sensor	CMOS con array
Tamaño sensor	23.6 x 15.8 mm
Fabricante del sensor	Desconocido
Velocidad ISO	Auto, 200 - 3200 (6400 con boost)
OPTICA	
Enfoque automático	Sí, Nikon Multi-CAM1000
Enfoque manual	Sí
Min Vel Disparo	30.00 segs
Max Vel Disparo	1 / 4000 segs
Multiplicador distancia focal	1.5
Árbol de lentes	Nikkor AF / F-Mount, D-type
EXPOSICIÓN	
Compensación de exposición	-5EV a +5EV en pasos de 1/3EV o 1/2EV

Medición (metering)	3D matrix metering II, centrado, puntual
FLASH	
Flash incorporado	Sí
Flash externo	Sí, zapata
Modos de flash	Cortina frontal y trasera, ojos rojos, lenta
CONTROL DE DISPARO	
Prioridad de abertura	Sí
Prioridad de obturación	Sí
Disparo en ráfaga	Sí, 4.5 fps(CH) o 1 a 4 fps (CL)
Temporizador	Sí, 2, 5, 10 o 20 segs
ALMACENAMIENTO	
Tipos almacenamiento	SD/SDHC card
Formato no comprimido	RAW
Formato comprimido	JPEG (EXIF 2.2)
Niveles de calidad	Fina, normal, básica
VISUALIZACIÓN	
Visor	óptico
LCD	3 "
LCD pixels	920000 pxs
CONEXIONES	
Salida video	Sí
USB	Sí
ALIMENTACIÓN	
Batería / Cargador	Sí
Tipo Batería	Nikon EN-EL3e
ESPECIFICACIONES FÍSICAS	
Formato	SLR
Peso con baterías	703 gr
Dimensiones	132 x 103 x 77 mm
OTROS	
Modo video	Sí, 720p 24 fps
Control Remoto	Sí, opcional (ML-L3 o MC-DC1)
Anclaje trípode	Sí
Sensor de orientación	Sí
Otra información	Pentaprisma, 96% y 0.96

*Tabla 1. Características de la cámara Nikon D90
(Nikon®, Nikonusa)*



*Figura 3: Cámara No Métrica Nikon D90
(Nikon®, Nikonusa)*

- Según la plataforma de la cámara:
 - Cámaras Aéreas: Las cámaras fotogramétricas que se emplean para tomar fotografías desde los aviones son poco parecidas a las ordinarias, estando todos sus elementos adaptados al trabajo especial que realizan.

Van situadas sobre el piso del avión por intermedio de una suspensión antivibrante y llevan una serie de dispositivos para que las operaciones propias de obtención de fotografía se realicen de un modo automático. (Orellana Ramírez, 2006)

Las cámaras fotogramétricas aéreas están constituidas por las cámaras propiamente dichas, un almacén de negativos y un dispositivo de mando.

A pesar de que todas las cámaras aéreas difieren ligeramente unas de otras, tienen suficientes parecidos como para hacer una descripción general que abarque todas ellas. Los tres componentes básicos de una cámara aérea son:

- Almacén o magazín.

- Cuerpo de la cámara.
- Ensamble del lente.

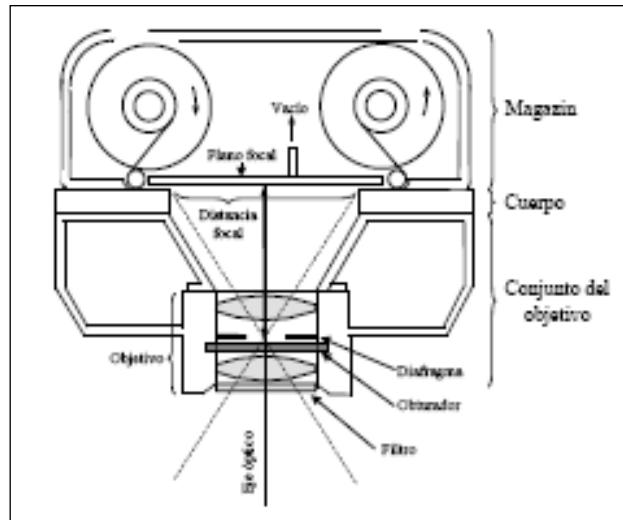


Figura 4: Esquema de Cámara Fotogramétrica Aérea

- Cámaras Terrestres: en el caso de cámaras métricas generalmente son dos cámaras con un chasis bastante estable, que se encuentran ubicadas a una distancia fija y es posible tomar imágenes con ambas simultáneamente, ya que poseen un mecanismo diseñado para este tipo de tomas y sus imágenes poseen marcas fiduciales.

En el caso de las cámaras no métricas, puede considerarse a cualquier cámara digital o analógica que posea cierta estabilidad en su chasis, preferiblemente réflex, como una cámara apta para ser empleada en fotogrametría arquitectónica o terrestre, siempre y cuando las precisiones que se esperen no sean las mismas que la de una cámara métrica.



*Figura 5. Cámara Terrestre Métrica.
(UCV)*

- Según su estructura en:
 - Cámaras Analógicas: Posee una cinta o negativo donde son capturadas las imágenes.. La fotografía tradicional no puede retocarse de forma inmediata. En las cámaras tradicionales la película se revela en el cuarto oscuro. Son cámaras con formatos generalmente de 35 mm. El almacenamiento en las cámaras analógicas se lleva a cabo sobre una superficie de celulosa fotosensible, en las digitales se realiza sobre una memoria, ya sea interna, externa o ambas.



*Figura 6. Cámara Analógica Nikon F3
(Nikon®)*

- Cámaras Digitales: Una cámara digital posee características geométricas similares a las del marco de una cámara de lente único, que emplea la película como medio de grabación. Se

compone de una matriz bidimensional de elementos de CCD (*Charge-Coupled Device*), llamado sensor de fotograma completo. El sensor se encuentra ubicado en el plano focal de una cámara de lente única. En el momento de la adquisición de una imagen, todos los elementos del CCD son expuestos simultáneamente, lo que produce la imagen digital. El sensor de CCD está compuesto por una matriz de 4096 filas por 4096 columnas de elementos de CCD, por lo que produce una imagen con casi 16.800.000 píxeles. (Wolf & Dewitt, 2000)

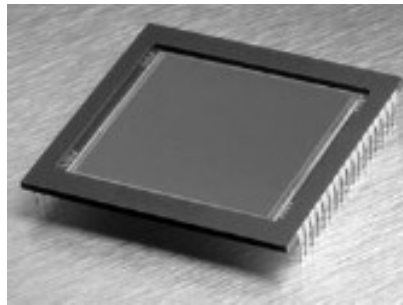


Figura 7: Sensor CCD KAF-16801E de 4096 × 4096 píxeles, tamaño de 36,88 × 36,88 mm. (KODAK)
(Jauregui, Web del Profesor/ULA/Nociones de Fotogrametría Digital, 2005)

Los rayos de luz de todos los puntos en la escena pasan por el centro de la lente antes de llegar a los elementos del CCD, lo que produce el mismo tipo de imagen de la perspectiva de los puntos, como habría de ocurrir si se utiliza la película.

Las cámaras digitales se clasifican en términos del número de píxeles existentes en la imagen. Estas no son muy costosas, suelen tener alrededor de una matriz de 500 filas por 500 columnas, lo que produce un total de 250.000 píxeles. Los arreglos de Megapíxeles poseen al menos 1 millón de píxeles (por ejemplo. 1024 x 1024) sobre el formato. Arreglos de matrice más grandes pueden llegar hasta 16 millones o más. La tecnología de hoy en día puede llegar a producir chips con

elementos de CCD individuales de un tamaño desde 5 hasta 15 μm . (Wolf & Dewitt, 2000)

Como se especificó anteriormente, la cámara elegida para este proyecto, es una *Cámara Digital No Métrica* marca *Nikon*®, modelo D90. Se eligió este tipo de cámara porque uno de los objetivos es demostrar la hipótesis que mediante el uso de cámaras comunes es posible realizar trabajos fotogramétricos con buenas precisiones, evitando así realizar mayores gastos cuando no es necesario. En muchas ocasiones se recurren a otros métodos de levantamiento más engorrosos para evitar el gasto que genera la adquisición de un equipo métrico, pero es posible obtener buenos resultados sin necesidad del uso de una cámara métrica, siempre y cuando la aplicación con la que se procesen los datos lo permita. Por esta razón se decidió elaborar una aplicación que admita el uso de cámaras no métricas, para evaluar las exactitudes que se pueden obtener y así corroborar la hipótesis planteada.

2.2.3. Calibración de la Cámara.

2.2.3.1. Definición.

Por calibración, desde el punto de vista fotogramétrico, entendemos un proceso en el que tratan de determinarse los parámetros geométricos (distancia focal y coordenadas del punto principal) y físicos (parámetros de la distorsión radial y tangencial) de la toma de las fotografías. También pueden incluirse entre estos últimos la falta de planaridad del plano imagen y del plano focal. Respecto a la focal, dada la imposibilidad física de llegar a conocer el valor verdadero de la toma (pues entre otras cosas se calcula en función de la distorsión que produce, y ésta es también desconocida), se llega al compromiso de obtener un valor convencional para el que se calculan los parámetros de la distorsión radial (Sánchez Martín, Arias Pérez, González Aguilera, & Gómez Lahoz, 2004).

2.2.3.2. Procedimientos de Calibración

En líneas generales, los métodos de calibración de las cámaras, pueden clasificarse en tres categorías básicas las cuales son: Métodos de Laboratorio, Métodos de Campo y Métodos Estelares (Wolf & Dewitt, 2000). De éstos, los métodos de laboratorio son los más frecuentemente utilizados y son normalmente realizadas por cualquiera de los fabricantes de cámaras u organismos del gobierno federal.

Desde el punto de vista operativo se recurre a distintas alternativas como (Sánchez Martín, Arias Pérez, González Aguilera, & Gómez Lahoz, 2004):

1. Establecer una transformación entre las coordenadas imagen 2D y las coordenadas del mundo real 3D. A este concepto responden los conocidos métodos de Tsai, Faugueras y Toscani, Song de Ma, etc. Ello da pie a numerosos procedimientos que utilizan, en definitiva, puntos de coordenadas reales conocidas mediante técnicas ajenas a la fotografía (topografía, geodesia) y cuyas coordenadas imagen también lo son.
2. Fotografiar patrones-objeto con características o restricciones geométricas tales como colinealidad, coplanaridad, ortogonalidad, puntos de fuga, etc. que facilitan la calibración sin necesidad de realizar mediciones auxiliares. Este método también se cita como el método "test field" de calibración. Algunas recientes experiencias se encuentran en Karras y Mavromamati (2001), Meng y Hu (2003) y Park y Hong (2001).
3. Utilizar haces proyectivos conocidos en su forma y en su posición. La más popular aplicación de este método conceptual es el procedimiento del multicolimador, utilizado sobre todo en calibración de cámaras aéreas en laboratorio.

El segundo método descrito anteriormente, fue el empleado en este Trabajo Especial de Grado, empleando el software Photomodeler, que utiliza un patrón impreso, y el cual será descrito con mayor detalle en el Capítulo 3.

Según los autores Wolf y Dewitt en su libro “Elements of Photogrammetry” los Elementos de Orientación Interior que se obtienen durante la calibración de la cámara son los siguientes:

- Distancia Focal Calibrada (también denominada constante de la cámara): Es la longitud focal que produce una distribución promedio de la distorsión radial del objetivo.
- Distorsión radial promedio del objetivo: distorsión de la posición de la imagen, a lo largo de líneas radiales, a partir del punto principal.
- Distorsión de descentralización del objetivo: esta es la distorsión de la lente que queda después de la compensación por la distorsión radial promedio del objetivo.
- Localización del punto principal, con coordenadas X_0 , Y_0 .
- Coordenadas de las Marcas Fiduciales.

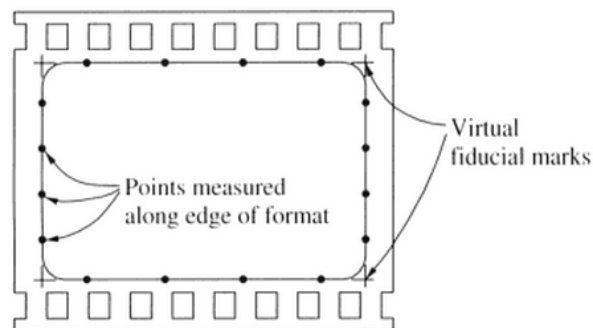
En este Trabajo Especial de Grado, se trabajó con una cámara digital terrestre no métrica, por lo que a continuación se explica cómo ocurre la calibración en ese caso, a diferencia de una cámara métrica, la cual posee una estructura más estable, además de las marcas fiduciales en las imágenes.

2.2.3.3. Calibración de Cámaras No Métricas.

Estas cámaras no están calibradas, por lo que si queremos usarlas para fines métricos debemos recurrir a algún procedimiento de auto calibración o de calibración “in situ”, según las precisiones y los recursos de que dispongamos. El gran problema con estas cámaras es la falta de estabilidad del sistema objetivo (y por tanto la variabilidad de la focal), por lo que es

conveniente realizar la calibración cada vez que se use y cambien las condiciones de la toma.

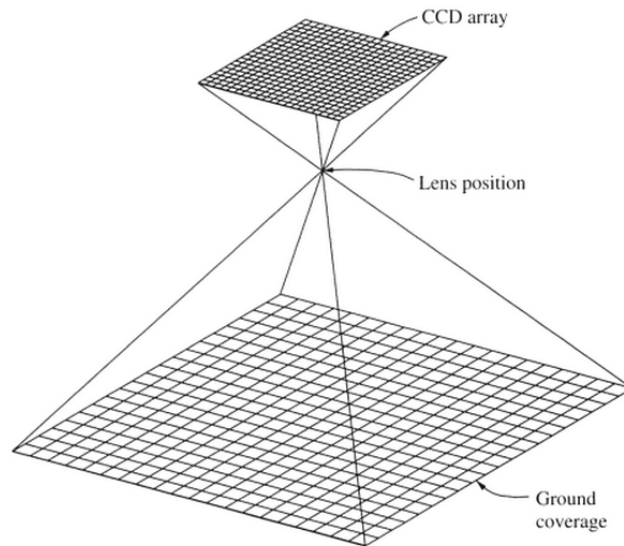
En el caso de las cámaras de película, el mayor problema es la distorsión de la película, en primer lugar por el hecho de no poseer marcas fiduciales que podrían ser empleadas como puntos de control, y en segundo lugar por el hecho de que el mecanismo de película no cumple con las condiciones de planaridad, las distorsiones pueden llegar a ser bastante variables. Una de las opciones para solucionar estos problemas consiste en establecer unas marcas fiduciales *virtuales*, como se ilustra en la siguiente figura, y mediante un proceso de regresión lineal a través de puntos ubicados en los bordes de la película, pueden ser determinadas las coordenadas de las marcas fiduciales anteriormente establecidas; esta operación se repite en varios negativos y con los valores promedios de las distancias entre marcas fiduciales se pueden establecer los valores calibrados de las coordenadas de las mismas.



*Figura 8: Mediciones de Puntos para el establecimiento de las marcas fiduciales virtuales en un negativo de 35mm de película.
(Wolf & Dewitt, 2000)*

La calibración de una cámara digital es en muchos sentidos más directa que la calibración de una cámara de película o analógica. Puesto que los elementos del CCD (Charge-Couple Device) se encuentran embebidos en silicón, por lo que esencialmente se encuentran siempre en una posición fija, lo que prácticamente elimina la distorsión considerada anteriormente en la película. En cierto modo, cada elemento del CCD constituye una marca

fiducial. Cada píxel en la imagen resultante está representado por un número digital en una matriz rectangular, la cual en un principio se supone que posee un patrón de cuadrícula perfecta. Sin embargo, en la realidad, la disposición de los elementos del CCD en el chip pueden no cumplir con ese patrón que se supone. El hecho de que la cuadrícula no sigue un patrón perfecto puede ser calibrado por la incorporación de dos dimensiones, mediante una transformación, como por ejemplo lo es la transformación afín. (Wolf & Dewitt, 2000).



*Figura 9: Geometría de una Cámara Digital.
(Wolf & Dewitt, 2000)*

2.3. Sistema de Coordenadas Imagen.

2.3.1. Mediciones en la Imagen.

En el caso de las Cámaras Métricas, las cuales poseen marcas fiduciales, el sistema de referencia comúnmente adoptado para coordenadas fotográficas, consiste en la sistema de forma rectangular, el cual se forma al unir con líneas rectas las marcas fiduciales. El eje x, suele ser arbitrariamente adoptado como la línea fiducial que sea casi paralela a la dirección de vuelo de la cámara (en el caso de fotogrametría aérea), en el caso de fotogrametría terrestre, es la línea

fiducial que une mejor las marcas fiduciales. El eje y positivo es de 90° en sentido contrario a las agujas del reloj, partiendo del eje x. El origen del sistema de coordenadas, se toma como la intersección de las líneas fiduciales, el cual es denominado, en la mayoría de los casos, como Punto Principal.

El sistema anteriormente descrito, se asume para cámaras analógicas, siempre y cuando éstas sean cámaras métricas.

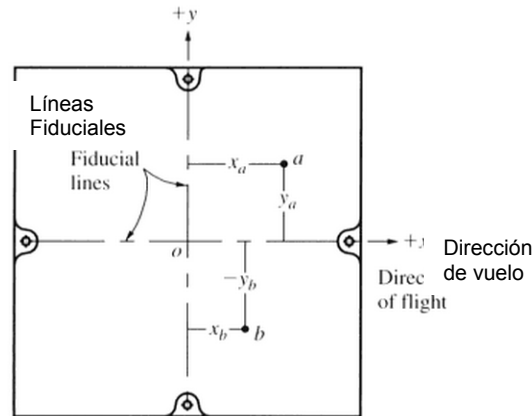


Figura 10: Sistema de Coordenadas Fotográfico basado en las Marcas Fiduciales (Wolf & Dewitt, 2000)

Para Cámaras Métricas Digitales, el sistema de coordenadas imagen sirve como referencia adecuada para la expresión de posiciones espaciales en el espacio imagen. Su origen es el centro de proyección. Las marcas fiduciales definen el Centro Fiducial **CF**. La separación entre el centro fiducial y el punto principal, **PP**, se conoce a partir del proceso de calibración de la cámara. El punto de mejor simetría, **PS**, es el origen de la distorsión radial. (Schenk, 2002)

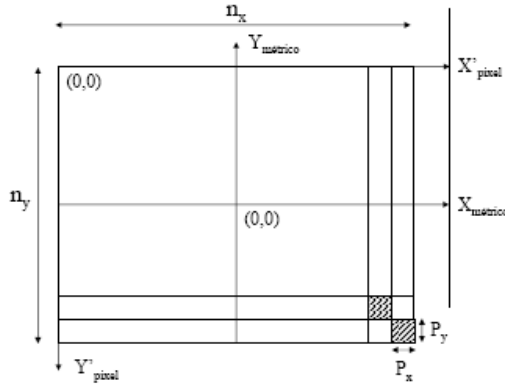


Figura 12: Coordenadas de la Imagen Digital
(Jauregui, Web del Profesor/ULA/Nociones de Fotogrametría Digital, 2005)

El sistema de coordenadas de la imagen digital difiere del sistema cartesiano en que su origen se ubica en el primer píxel del sensor, por lo que se encuentre a la izquierda y en la parte superior. Esta diferencia entre ambos sistemas se debe al propio carácter numérico de la imagen, lo que hace que el primer píxel sea el primer elemento $(p(1, 1))$ de la matriz p . (Jauregui, Web del Profesor/ULA/Nociones de Fotogrametría Digital, 2005)

2.3.2. Escalas para Mediciones Fotogramétricas.

La escala de una fotografía aérea viene dada por la relación:

$$E = \frac{H}{c}$$

c = distancia principal

H = altura de vuelo sobre el terreno

En un perfil de terreno no llano existirán infinitos valores de escala. Por ello, al referirnos a la escala de un fotograma, lo estamos haciendo a un valor medio, respecto a un plano de referencia, elegido con criterio de que se encuentre equidistante, entre el plano tangente a las mayores elevaciones del terreno y la de mayores depresiones.

Pues bien, recordando que el dato altimétrico está referido al nivel medio del mar (H'), por lo que, para conocer la escala de una fotografía con el referido indicador, será preciso restar la altitud del plano de referencia (nmm) el valor o altura del elemento.

$$E = \frac{c}{(H' - h)}$$

H' = altura sobre el nmm

h = altura del objeto o elemento.

2.3.3. Transformación del Sistema Píxel al Sistema de Coordenadas Imagen.

La transformación de un punto P en el sistema píxel (f_p, c_p) al sistema de coordenadas es tan sencilla como demuestran las ecuaciones siguientes:

$$x_p = (c_p - c_o)p_c$$

$$y_p = -(f_p - f_o)p_f$$

$$z_p = -f$$

Donde f_o, c_o son las coordenadas píxel del punto principal y $p_f \times p_c$ es el tamaño del píxel en unidades métricas, por ejemplo micras. (Schenk, 2002).

Las coordenadas píxel del punto principal provienen de la de la calibración de la cámara, en el caso de imágenes digitales.

2.4. Visión Estereoscópica.

2.4.1. Percepción de la Profundidad.

Durante las actividades diarias del ser humano, éste siempre se encuentra midiendo, inconscientemente, la profundidad o juzgando las distancias existentes entre los objetos que lo rodean, dentro del proceso normal de la visión. Los métodos que permiten juzgar la profundidad pueden clasificarse como: Estereoscópicos y Monoscópicos. Las personas con una visión normal (aquellas capaces de observar con ambos ojos simultáneamente) se dice que poseen una visión binocular, y la percepción de la profundidad a través de la visión binocular se denomina Visión Estereoscópica. El término de Visión Monocular es aquel

que se logra cuando se observa sólo con un ojo, y los métodos para juzgar distancias en este caso se denominan Monoscópicos. Una persona con visión binocular normal puede, por supuesto, ver de manera monocular al ocultarse un ojo. (Wolf & Dewitt, 2000)

La distancia a los objetos o la profundidad, pueden ser percibidas con visión monocular, basándose en los siguientes criterios: tamaños relativos de los objetos, objetos ocultos tras otros, sombras y las diferencias de enfoque que realiza el ojo para poder ver los objetos a diferentes distancias. Los métodos monoscópicos para percibir la profundidad introducen imprecisiones al momento de establecer la distancia entre objetos. Por el contrario, mediante la visión Estereoscópica, se puede obtener una percepción de profundidad con un grado mucho más alto de precisión. La percepción Estereoscópica de Profundidad es de fundamental importancia dentro de la fotogrametría, porque permite la formación de un modelo tridimensional, mediante la observación de un par de fotografías que se solapan, denominado estereopar, y sobre el cual es posible medir, estudiar y crear un mapa.

Para el Trabajo Especial de Grado, que se describe en este informe, se empleó un Estereopar, que facilitó la observación tridimensional del elemento a levantar.

2.4.2. El Ojo Humano.

El ojo humano presenta una gran similitud con la cámara fotográfica, en cuanto al sistema óptico se refiere. La cornea y el cristalino enfocan la imagen sobre la superficie fotosensible que constituye la retina. La longitud focal del cristalino es de 17 mm., lo cual da un ángulo de 180° , libre de distorsión por proyectar sobre una superficie esférica, adaptada completamente a la proyección central. La reducida distancia focal del ojo ofrece la ventaja de su gran profundidad de campo, lo que permite tener enfocado al mismo tiempo una distancia nítida por delante y por detrás del sujeto enfocado. La cantidad de luz que penetra en el ojo está controlada por el iris, el cual es un diafragma

controlado por músculos que lo cierran y abren desde un diámetro de 2mm, cuando existe iluminación fuerte, hasta 8 mm, cuando existe iluminación tenue; estas aperturas límites equivalen a los valores $f/8$ y $f/2$, respectivamente. (Jauregui, Web del Profesor/ULA/Paralaje, 2005).

La retina es la parte del ojo que se encarga de registrar la imagen proyectada sobre ella. Posee aproximadamente 130 millones de fotorreceptores, de dos diferentes tipos: conos y bastoncitos. Estos fotorreceptores se encuentran en la última capa de las tres que conforman la retina

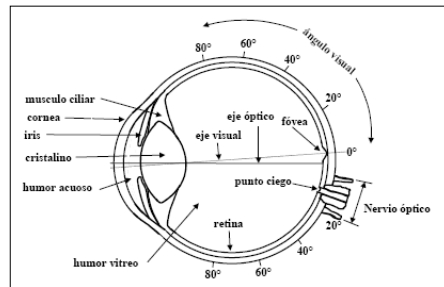


Figura 13: Sección Transversal del Ojo Humano. (Jauregui, Web del Profesor/ULA/Paralaje, 2005)

2.4.3. Percepción Estereoscópica de la Profundidad.

Con la visión binocular, cuando los ojos se fijan en un cierto punto, los ejes ópticos de ambos convergen en ese punto, cruzándose con un ángulo denominado *ángulo de paralaje*. Mientras más cercano esté el objeto, mayor será ese ángulo y viceversa.

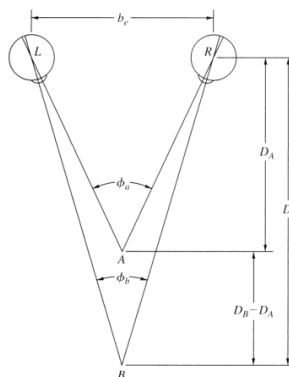


Figura 14: Percepción Estereoscópica de la Profundidad en función del Ángulo de Paralaje. (Wolf & Dewitt, 2000)

En la figura anterior, los ejes ópticos de los ojos L y R están separados una distancia b_e , denominada la base de los ojos. En el caso de un adulto promedio, esta distancia se encuentra entre 63 mm. y 69 mm. Aproximadamente. Cuando los ojos se fijan en un punto A , los ejes ópticos convergen, formando el ángulo de paralaje Φ_a . De forma similar, cuando se observa un punto B , los ejes ópticos también convergen, formando otro ángulo de paralaje Φ_b . El cerebro automáticamente e inconscientemente asocia la distancia D_A y D_B con sus correspondientes ángulos de paralaje Φ_a y Φ_b . La profundidad entre A y B queda determinada por la diferencia $D_B - D_A$ y es percibida mediante la diferencia existente entre los ángulos de paralaje de cada punto.

2.4.4. Observación de Imágenes Estereoscópicamente.

Suponiendo que una persona está mirando un objeto A en la siguiente figura, si se coloca un medio transparente en frente de los ojos que contiene las marcas de la imagen a_1 y a_2 , como se muestra a continuación. Supongamos, asimismo, que las marcas de la imagen tienen la misma forma que el objeto inicial A , y que son colocadas justo en los ejes ópticos, de manera que es imposible para los ojos detectar si están observando el objeto o la marca sobre el medio transparente. De esta forma, el objeto A puede ser removido sin que se note un cambio en las imágenes que la persona observa. Si se acercan una a otra las marcas nombradas anteriormente (a_1' y a_2') el ángulo de paralaje aumenta y el objeto se percibe más cercano a los ojos, y si ocurre lo contrario, el objeto se observaría más lejano.

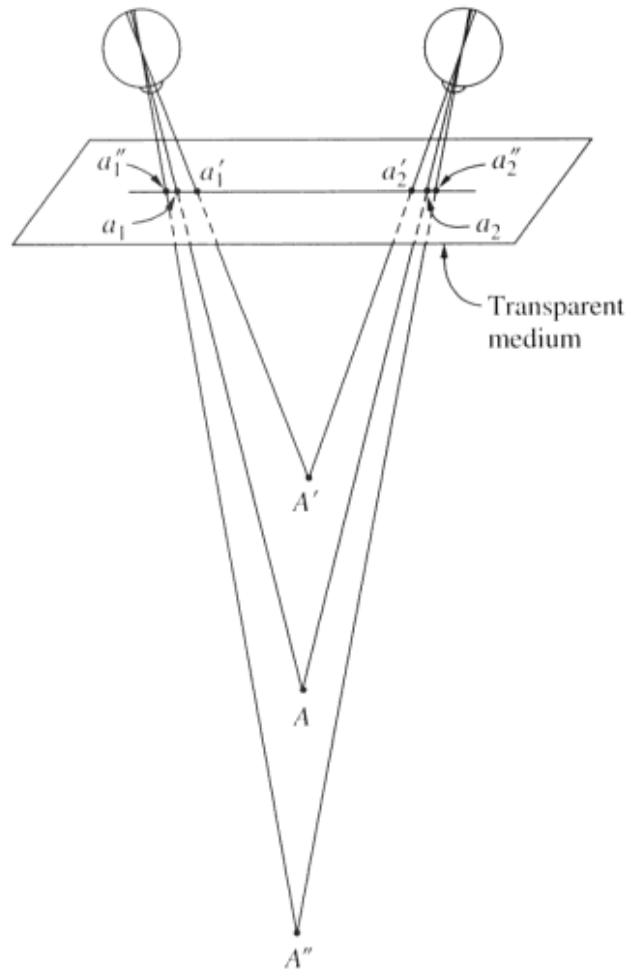


Figura 15: La Profundidad Aparente del Objeto puede ser Modificada, cambiando la Separación de las Imágenes.
(Wolf & Dewitt, 2000)

El fenómeno de crear la impresión de tridimensionalidad o estereoscopia de los objetos mediante la observación de sus imágenes, puede lograrse a través de la fotogrametría. En la siguiente figura, suponiendo que se toman un par de fotografías aéreas desde dos estaciones L_1 y L_2 , de manera que el edificio se encuentre en ambas fotos. La altura de vuelo se considera como H' , y la distancia entre las dos tomas es B . Los puntos objetos son A y B ubicados en la parte superior e inferior del edificio respectivamente, se encuentran representados en las tomas como a_1 y b_1 en la imagen izquierda y como a_2 y b_2 en la imagen derecha.

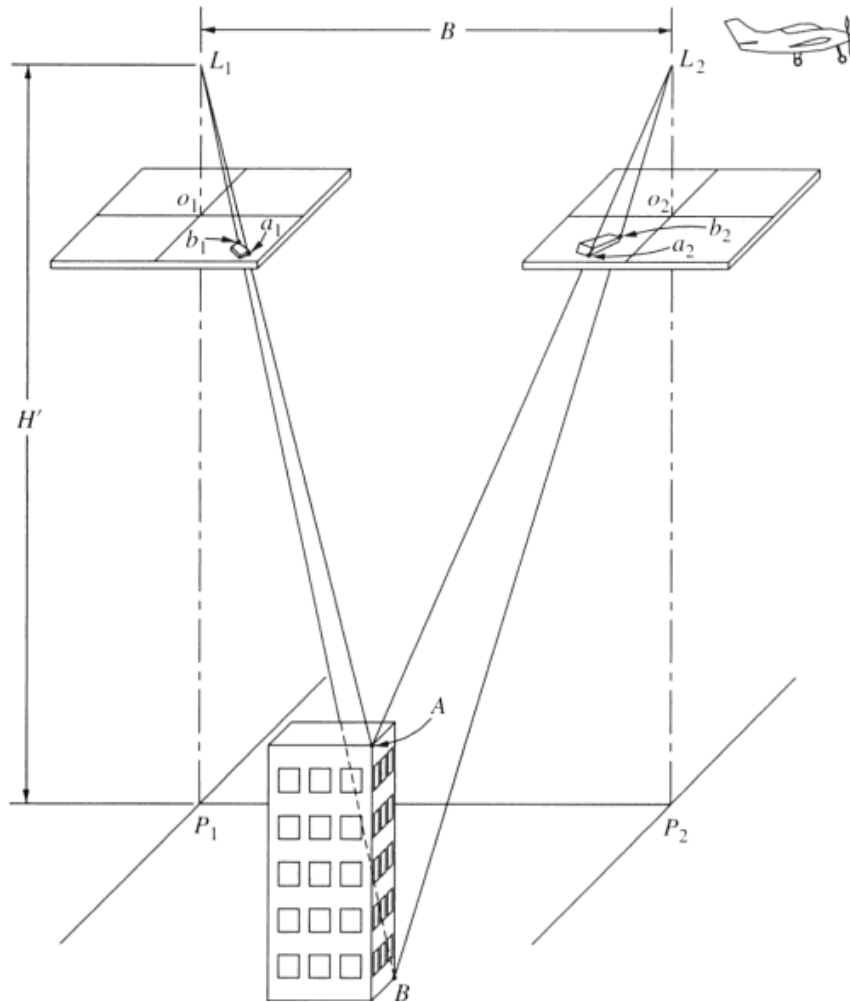


Figura 16: Fotografías de dos estaciones de toma que poseen un edificio como objeto común.
(Wolf & Dewitt, 2000)

Ahora bien, si ambas fotografías se encontrasen sobre una mesa, de manera tal que la foto izquierda sólo pueda ser vista por el ojo izquierdo, y la foto derecha por el ojo derecho, se podría obtener una vista tridimensional del edificio. La visión tridimensional aparecería como si estuviese por debajo de la mesa a una distancia h de los ojos. Este modelo tridimensional que se forma es denominado Modelo Estereoscópico o Estereomodelo, y el par de fotografías que se solapan son designadas como Estereopar. (Wolf & Dewitt, 2000)

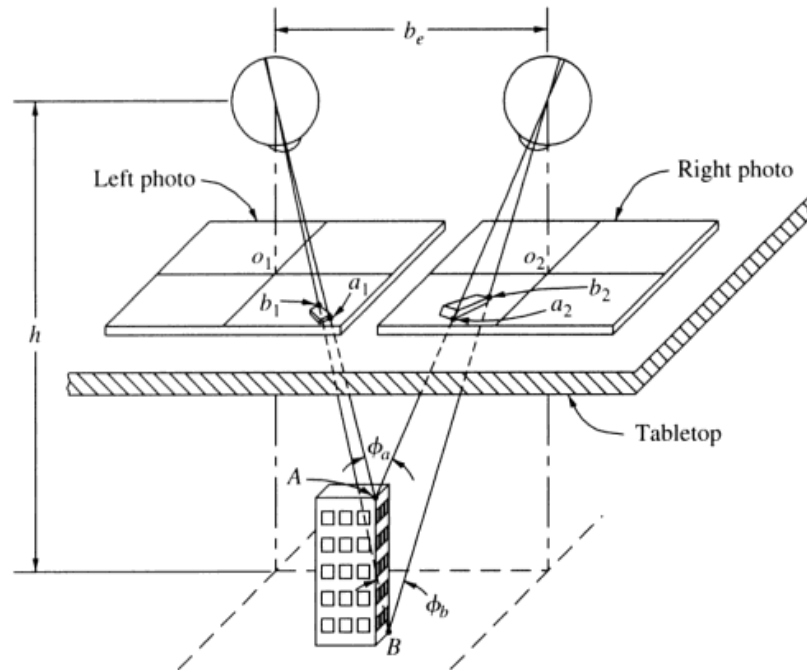


Figura 17: Observación Estereoscópica del Edificio.
(Wolf & Dewitt, 2000)

2.4.5. Estereoscopios.

Resulta bastante complicado poder observar fotografías de forma estereoscópica sin la ayuda de algún dispositivo óptico. Además de tratarse de una operación antinatural, uno de los principales problemas de la observación estereoscópica sin ayuda de dispositivos es que los ojos se centran en las imágenes, mientras que al mismo tiempo el cerebro está percibiendo los ángulos de paralaje, los cuales forman el estereomodelo a una cierta profundidad más allá de las fotos, es toda una situación bastante complicada. (Wolf & Dewitt, 2000).

Existe una gran cantidad de Estereoscopios, que sirven para diversos propósitos. Casi todos se operan esencialmente de la misma manera. En este Trabajo Especial de Grado se utilizó un Estereoscopio de Espejos o Estereoscopio de Reflexión, llamado así por algunos autores, por esta razón en esa sección se hará referencia sólo a este tipo de estereoscopio.

El Estereoscopio de Espejos permite que las dos imágenes sean observadas separadamente de manera estereoscópica, lo que elimina el problema de que una foto oculte parte de la otra en el solape, permitiendo así observar todo el ancho del modelo estereoscópico.



*Figura 18: Estereoscopio de Espejos.
(www.stakemill.com)*

El estereoscopio posee dos grandes espejos, en forma de alas, y dos pequeños espejos oculares, los cuales están montados en un ángulo de 45° con respecto a la horizontal. Los rayos de luz que emanan de los puntos sobre la imagen como a_1 y a_2 , son reflejados desde las superficies de los espejos y recibido en los ojos, formando así el ángulo de paralaje Φ_a . El cerebro asocia automáticamente la profundidad del punto A con el ángulo de paralaje. De esta manera se genera el modelo estereoscópico debajo de los espejos oculares, como se ilustra en la siguiente figura. (Wolf & Dewitt, 2000)

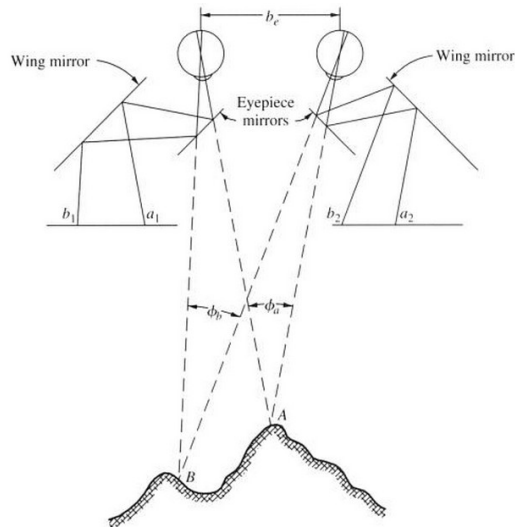


Figura 19: Principio de Funcionamiento del Estereoscopio de Espejos.
(Wolf & Dewitt, 2000)

Durante el proceso de estereoscopia es importante orientar las fotografías, de manera que el ojo izquierdo y el ojo derecho observe la imagen izquierda y la derecha respectivamente.

2.4.6. Principios de la Marca Flotante

Los paralajes de los puntos pueden ser medidos en forma estereoscópica, con la ventaja de la rapidez y de la precisión, mediante el uso de la marca flotante.

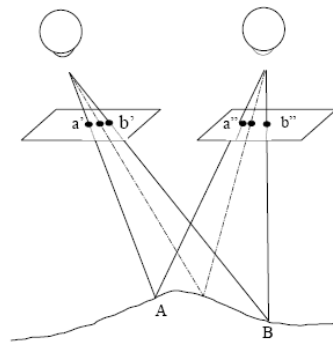


Figura 20. Esquema de la Marca Flotante
(Jauregui, Web del Profesor/ULA/Paralaje, 2005)

El principio de la marca flotante consiste en colocar dos marcas idénticas, una sobre cada fotografía. Cuando cada una de ellas se encuentre sobre un punto homólogo en la respectiva fotografía, se verán entonces como un solo punto en contacto con el terreno o, en el caso de la Fotogrametría Terrestre con la superficie. Si una de las marcas se acerca o se aleja respecto a la otra, se tendrá la impresión de que el punto subirá o bajará con respecto al terreno. Basado en: (Jauregui, Web del Profesor/ULA/Paralaje, 2005)

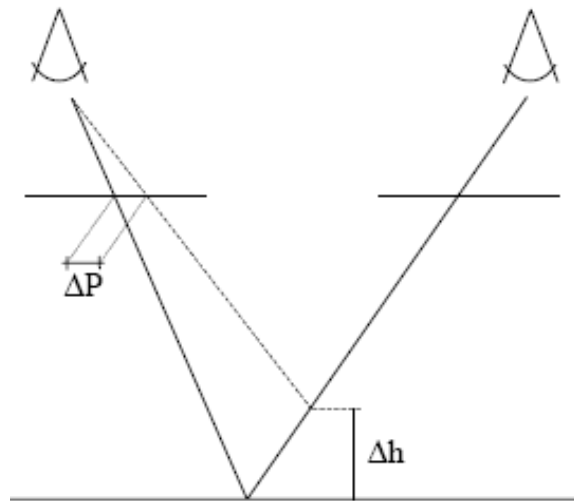


Figura 21. Relación entre Paralaje y Altura en la Marca Flotante.
(Jauregui, Web del Profesor/ULA/Paralaje, 2005)

2.4.7. Paralaje Estereoscópico.

Paralaje es el cambio de posición de la imagen de un punto en dos fotografías sucesivas, debido al cambio de posición de la cámara en el momento de la toma. (Jauregui, Web del Profesor/ULA/Paralaje, 2005)

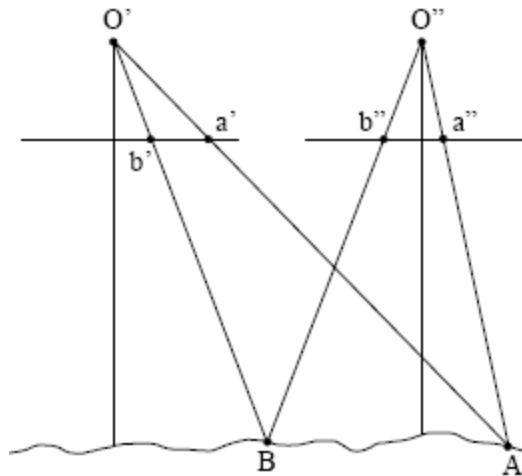


Figura 22. Geometría General de Fotografías Consecutivas.
(Jauregui, Web del Profesor/ULA/Paralaje, 2005)

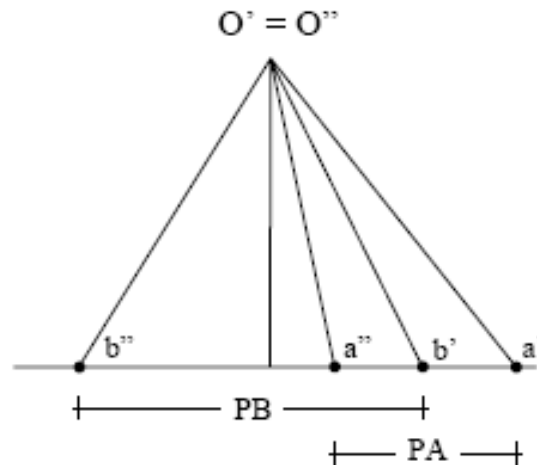


Figura 23. Superposición de Fotografías Consecutivas.
(Jauregui, Web del Profesor/ULA/Paralaje, 2005)

De la figura anterior podemos relacionar:

$$PA = X'_a - X''_a$$

$$PB = X'_b - X''_b$$

$$PA = D - da$$

$$PB = D - db$$

2.5. Fotogrametría Analítica.

2.5.1. Mediciones en la Imagen.

Un tipo de medición que es fundamental dentro de la fotogrametría analítica es el del par de coordenadas x e y de la fotografía. Estas coordenadas, que son generalmente medidas en milímetros, deben estar referidas al punto principal como punto de origen del sistema imagen. Ya que las relaciones matemáticas de la fotogrametría analítica se basan en supuestos como que “los rayos de luz viajan en línea recta” y “el plano focal de la cámara es completamente plano”, se requieren de varios ajustes en las coordenadas para poder corregir los valores de distorsión que generan el no cumplimiento de las suposiciones anteriormente nombradas. (Wolf & Dewitt, 2000).

Existen una gran cantidad de instrumentos y técnicas para realizar las mediciones de coordenadas de la imagen. Para asegurar que las precisiones que se obtengan sean las más altas, estas mediciones deben realizarse con máximo cuidado. En muchos métodos de fotogrametría analítica es necesario medir en más de una foto las coordenadas imagen de un mismo objeto, por lo que es esencial que la imagen de cada punto de un objeto sea identificada con precisión en las fotografías, de esta forma las mediciones serán coherentes.

2.5.2. Puntos de Control

Además de la medición de coordenadas imagen, un cierto número de puntos de control en el espacio objeto son requeridos durante los procedimientos de la fotogrametría analítica. Las coordenadas de los puntos del espacio objeto, los cuales pueden ser tanto identificables dentro de la imagen como las estaciones de toma de las propias fotos, son generalmente determinadas mediante algún método topográfico, como GPS, Radiación, etc. Es importante que estas coordenadas o puntos de control se encuentren referidos a un sistema tridimensional, cuyos ejes sean perpendiculares entre sí.

2.5.3. Condición de Coplaneidad.

Puede efectuarse el cálculo de los elementos de la orientación relativa analítica a partir de la condición de coplaneidad (plano epipolar o nuclear). Esta condición establece que los centros de proyección (O_1 , O_2), puntos imagen homólogos (p' , p'') y puntos objeto $P(X, Y, Z)$ han de estar contenido en un único plano. (Pérez Álvarez, 2001).

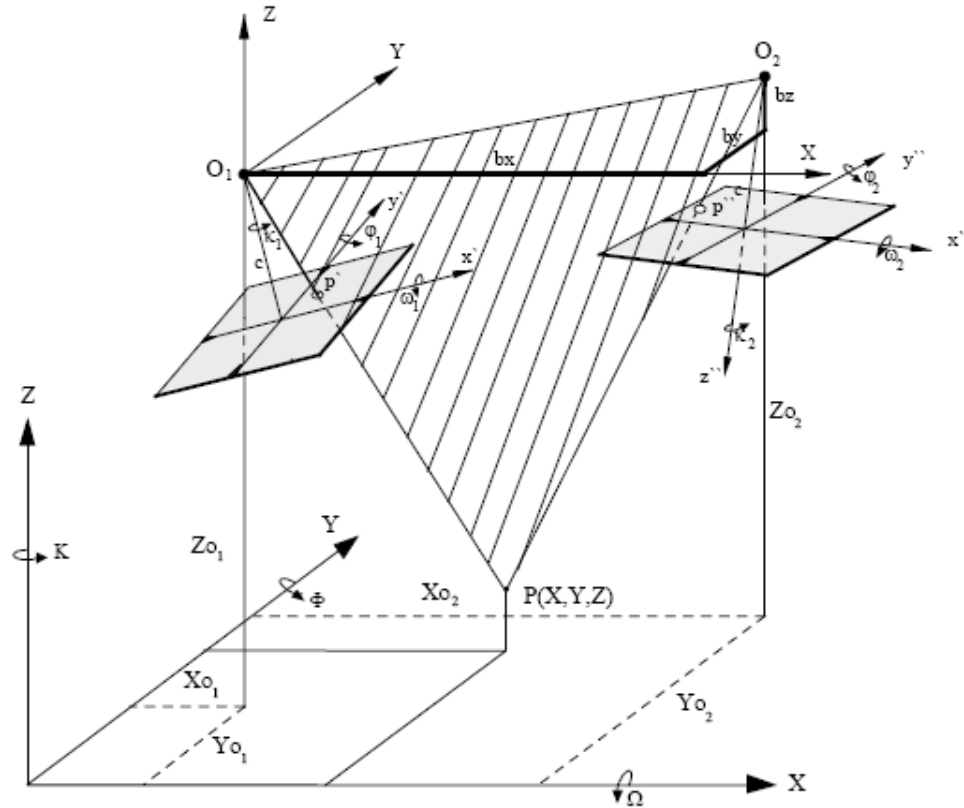


Figura 24: Condición de Coplaneidad.
(Pérez Álvarez, 2001)

La condición de coplaneidad puede expresarse como:

$$\Delta = \begin{bmatrix} X_{o1} & Y_{o1} & Z_{o1} & 1 \\ X' & Y' & Z' & 1 \\ X_{o2} & X_{o2} & X_{o2} & 1 \\ X'' & Y'' & Z'' & 1 \end{bmatrix} = 0$$

Supongamos que el origen de coordenadas está en el centro de proyección izquierdo (O_1), la condición de coplaneidad puede expresarse de la forma siguiente:

$$\Delta = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ bx & by & bz & 1 \\ \bar{x}' & \bar{y}' & \bar{z}' & 1 \\ x_2 & y_2 & z_2 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} bx & by & bz \\ \bar{x}' & \bar{y}' & \bar{z}' \\ x_2 & y_2 & z_2 \end{bmatrix} = 0$$

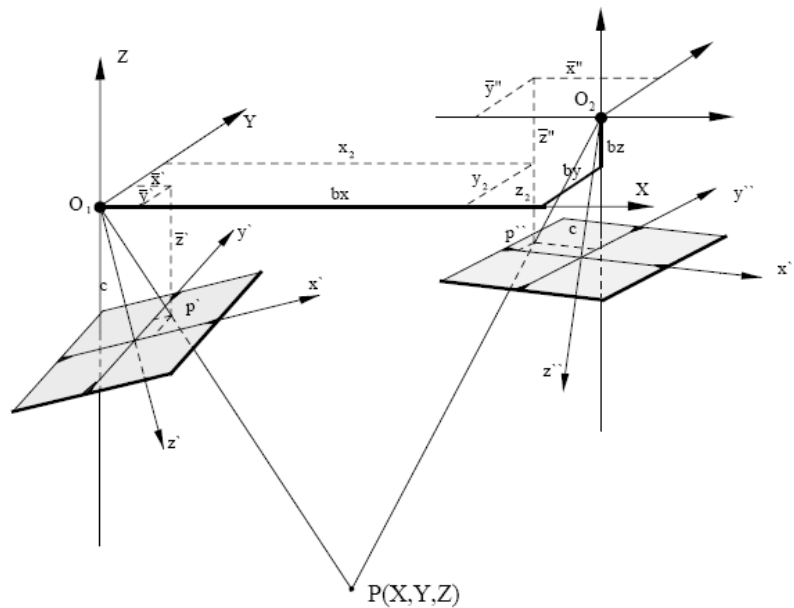


Figura 25: Sistema con origen en el Centro de Proyección Izquierdo. (Pérez Álvarez, 2001)

Donde:

- bx, by, bz son las coordenadas de O_2 en el sistema modelo.
- $\bar{X}', \bar{Y}', \bar{Z}'$ son las coordenadas de p' en el sistema modelo.
- x_2, y_2, z_2 son las coordenadas de p'' en el sistema modelo.

El compendio de formulas respectivas a esta condición son desarrolladas en el capítulo siguiente, en el apartado 3.3.2 , allí son desarrolladas cada una de las condiciones.

Ahora bien, una vez analizada la Condición de Coplaneidad con la que se desarrolló el trabajo aquí descrito, es importante conocer que es bajo esta

formulación que se elabora la orientación relativa y absoluta. Se pueden presentar diferentes situaciones al momento de orientar, según sea el sistema de referencia del modelo ya sea para: Orientar por Empalme de Fotos Consecutivas u Orientar un Par de Fotos Independientes. En este trabajo, se presenta el primer caso nombrado, por lo que la formulación a presentar en el punto 3.3.2 surge de este principio.

2.5.4. Orientación Relativa.

La Orientación Relativa se lleva a cabo para determinar en un par fotogramétrico las orientaciones angulares y la posición relativa de ambas fotos en el momento de la toma para asegurar que rayos homólogos intersecten. De esta forma, los parámetros que se establecen son relativos, de una fotografía respecto a otra en el espacio. (Sánchez Sobrino, 2006)

En fotogrametría analógica, la orientación relativa se llevaba a cabo eliminando el paralaje en 5 puntos bien repartidos por el modelo, denominados puntos de Von Gruber, modificando los elementos de traslación (b_x , b_y , b_z) y rotación (ω , ϕ , κ) de un portaplacas respecto a otro en un sistema tridimensional de coordenadas modelo. Eliminando visualmente el paralaje según una secuencia de traslaciones y rotaciones establecidas en 5 puntos del modelo aseguraba la orientación relativa en todo el modelo.

En fotogrametría analítica y digital la orientación suele llevarse a cabo basándose en las denominadas condiciones de coplaneidad o bien de colinealidad, mediante un proceso iterativo por mínimos cuadrados.

En ambos casos y aunque dentro de ellos existen múltiples variantes y parámetros a determinar, el resultado deber ser, como siempre, los parámetros de orientación de un fotograma respecto a otro, expresados en forma de tres giros y tres traslaciones por fotograma, de tal forma que cuando exploremos una zona del modelo, estos parámetros se calculen en tiempo real para presentarnos una zona sin paralaje, formando modelo estereoscópico.

Dentro del marco de la **Fotogrametría Analítica** y mediante la **Condición de Coplaneidad** para el caso de **Empalme de Fotos Consecutivas**, se desarrollaran las fórmulas pertinentes, con las que se elaboró la aplicación digital.

2.5.5. Orientación Absoluta.

Una vez formado el modelo estereoscópico y suponiendo libre de paralaje vertical el modelo, sólo queda posicionar en un sistema de coordenadas absoluto el modelo y determinar un factor de escala, o lo que es lo mismo, “nivelarlo” respecto a un sistema de coordenadas terreno, trasladarlo a su posición en el espacio y darle escala.

En fotogrametría analógica esto se conseguía aplicando unos nuevos giros y traslaciones al modelo así como determinando un factor de escala: en total siete parámetros. Ello se conseguía conociendo las coordenadas terreno de al menos tres puntos identificables en la fotografía (en realidad, dos puntos y la coordenada Z de un tercero, para resolver las siete incógnitas). Estos puntos son los que se conocen con el nombre de puntos de apoyo. (Sánchez Sobrino, 2006)

Matemáticamente esto se consigue a través de una transformación ortogonal espacial en el que hay siete incógnitas: tres traslaciones, tres rotaciones y un factor de escala, partiendo de que se conocen mínimo 3 puntos de apoyo, es decir, sus coordenadas en el modelo y en el terreno, obteniéndose así la siguiente ecuación:

$$\begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{bmatrix} = \lambda [R] \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{bmatrix}$$

Donde:

- λ : factor de escala.
- $[R]$: $f(\Omega, \Phi, K)$ matriz de rotación del sistema modelo al sistema terreno.
- T_x, T_y, T_z : traslaciones del sistema modelo respecto del terreno.

El proceso de resolución de este tipo de ecuaciones se resuelve mediante una Transformación de Semejanza Tridimensional, que se describe a continuación.

Una transformación tridimensional de semejanza es aquella que no varía la verdadera forma del objeto después de realizar la transformación.

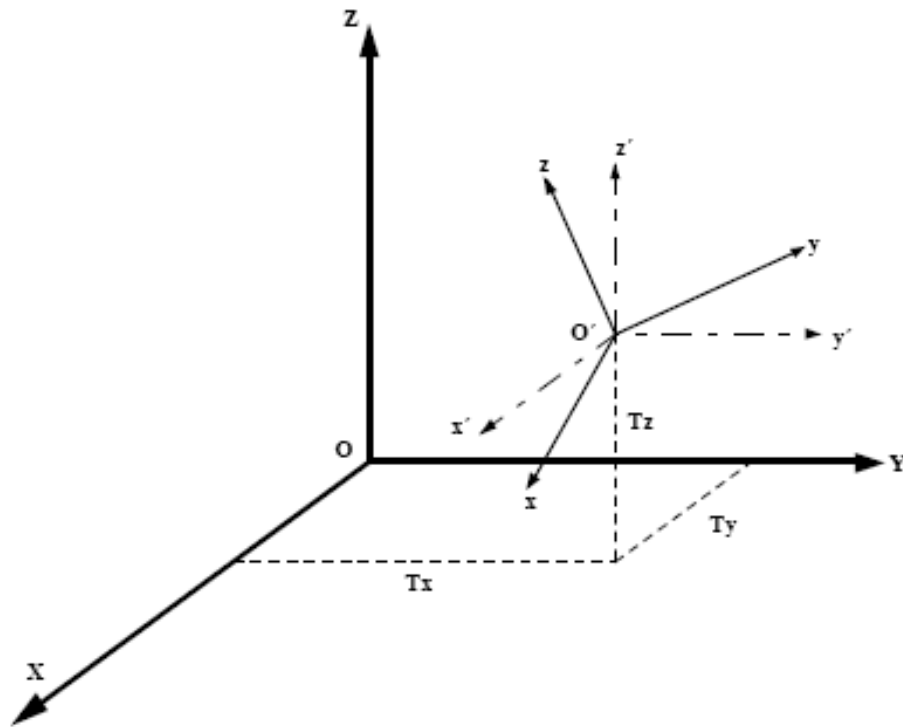


Figura 26. Sistema Tridimensional de Referencia y Arbitrario.
(Pérez Álvarez, 2001)

Partiendo de los sistemas de la figura, se quiere transformar las coordenadas de puntos del sistema (x, y, z) al sistema (X, Y, Z) . Como puede observarse en esta figura, los dos sistemas de coordenadas no son paralelos necesitando la transformación, el uso de siete parámetros de transformación independientes:

- Tres rotaciones (Ω, Φ, K)

- Un factor de escala.
- Tres Traslaciones (T_x, T_y, T_z)
- Las **Rotaciones** están basadas en la Matriz de Euler, en donde las ecuaciones son deducidas según una secuencia de tres rotaciones independientes, de dos dimensiones, ya que cada giro producirá variaciones en las coordenadas (x', y', z') de un punto cualquiera, teniendo en cuenta que la coordenada que se mide en el eje en torno al cual se efectúe el giro, no variará con éste. Para entender un poco más esto, se ilustrará con la figura siguiente, en donde se observa cuál giro corresponde con cada eje.

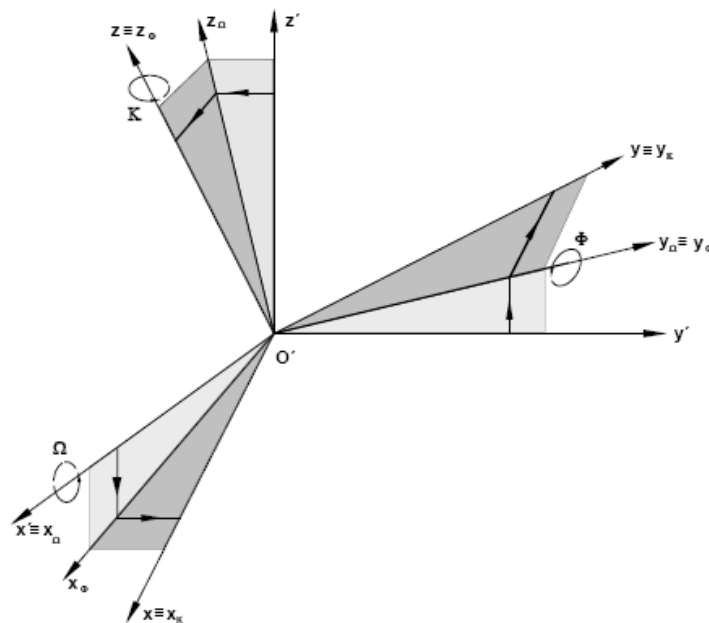


Figura 27. Definición de las rotaciones sobre cada uno de los ejes del sistema tridimensional.
(Pérez Álvarez, 2001)

No es necesario desglosar cada una de las rotaciones independientemente, ya que no es el objetivo de este trabajo, por lo que bastará con saber que se obtiene una matriz \mathbf{R} ortogonal ($\mathbf{R}^{-1}=\mathbf{R}^T$) cuyos elementos, dentro de la expresión general, se muestran en el punto 3.3.2

- **Traslaciones y Factor de Escala**, considerando el caso más general de ejes girados, trasladados y con diferentes unidades de medida, la

expresión general de este procedimiento también se desarrolla en el siguiente capítulo.

Resolviendo las Rotaciones, las Traslaciones y aplicando el Factor de Escala se logra resolver la Orientación Absoluta, la cual es descrita con mayor detalle en el capítulo siguiente.

2.6. La Fotogrametría Terrestre.

2.6.1. Definición.

Es aquella que utiliza fotografías tomadas sobre un soporte terrestre; debido a esto, la posición y los elementos de orientación externa de la cámara son conocidos de antemano. Si bien fue la primera aplicación práctica de la fotogrametría, actualmente se usa principalmente en labores de apoyo a la arquitectura, arqueología, ingeniería estructural y en levantamientos topográficos de terrenos muy escarpados. Algunos autores ubican a los usos de la fotogrametría en arquitectura y arqueología en la división de objetos cercanos; sin embargo, cuando los objetos a levantar se vinculan con su posición sobre el terreno, se realiza una actividad de carácter topográfico; por ello, pueden ser ubicadas en esta división. Para los levantamientos fotogramétricos terrestres se toman: fotografías horizontales y fotografías oblicuas. (Wolf & Dewitt, 2000)

2.6.2. Antecedentes de la Fotogrametría Terrestre y la Fotogrametría Arquitectónica.

La Fotogrametría Terrestre surge por la necesidad realizar de levantamientos topográficos más rápidos y de menos costos mediante las fotografías del terreno. Aimé Laussedat (1819-1904), ingeniero militar francés, es considerado el fundador de la Fotogrametría Terrestre debido a que en 1849, con la ayuda de una cámara lúcida o clara, denominada Wollaston, reprodujo las características topográficas sobre un plano a partir del dibujo de perspectivas; el resultado fue la reproducción gráfica de la fachada del Hôtel des Invalides de París. Poco tiempo después empleó una cámara oscura con el fin de obtener

mayor definición de contornos y accidentes del terreno. Interceptando tres vistas colocadas sobre otro plano reprodujo el plano del fuerte de Vincennes a escala 1:2000 en papel transparente. Éste francés introdujo dos términos: Metrofotografía e Iconometría.

El método metrofotográfico fundado por Laussedat tardó unos años antes de ser aplicado en extenso. Los primeros ensayos fotogramétricos tuvieron un carácter aislado y experimental, y fueron realizados con la intención de comparar los costos, el tiempo y la eficacia del método con los procedimientos tradicionales. Los países con extensas áreas alpinas fueron los primeros en realizar dichos ensayos. En Francia, la sección fototipográfica dirigida por el capitán de ingenieros Javary ensayó los nuevos métodos desde 1863 en el macizo de los Vosgos. (Muro Morales, Urteaga, & Nadal, 2002)

La Fotogrametría Arquitectónica fue empleada, por primera vez, por el arquitecto alemán Albrecht Meydenbauer, quien hizo su primer levantamiento fotogramétrico en 1867, luego de que en 1858 en Wetzlar, como director de la Oficina Estatal de Construcciones, recibiera el encargo de medir la altura de la fachada de la catedral. Meydenbauer casi se mata al intentar tal medición utilizando sogas y aparejos. Más sencillo y menos peligroso, le resultó la idea de utilizar fotografías que luego, trigonométricamente, le permitieron deducir las medidas exactas del edificio (Ricardo Parodi, 2003). El Instituto Geográfico Militar italiano realizó en Los Alpes los primeros trabajos Fotogramétricos en 1878, dirigidos por Michele Monzi. En 1885, en Prusia nace el Real Instituto de Fotogrametría, con el fin de reproducir monumentos y estructuras arquitectónicas a partir de fotografías. (Muro Morales, Urteaga, & Nadal, 2002)

2.6.3. Objetivo de la Fotogrametría Analítica en el Marco de la Fotogrametría Terrestre

El objetivo de la Fotogrametría Analítica es resolver los Modelos Matemáticos, es decir, obtener coordenadas de salida relativas al objeto. Para ello, es habitual (hay excepciones) proceder en dos fases: fase de cálculo, en la

que se determinan los parámetros que permiten relacionar los dos sistemas de coordenadas implicados; y fase de transformación subsiguiente, en la que mediante los parámetros determinados en la fase previa se pueden transformar las coordenadas de entrada en las coordenadas de salida.

Características de la fase de cálculo

- Son datos conocidos (ya sean observaciones o datos calculados en alguna fase previa): Las coordenadas en ambos sistemas.
- Son incógnitas: Los parámetros geométricos que expresan la relación entre sistemas.
- Determinación de los parámetros de orientación interior y exterior de las tomas.

Características de la fase de transformación

- Son datos conocidos (ya sean observaciones o datos calculados en alguna fase previa): Las coordenadas de entrada y los parámetros geométricos que permiten relacionar (en este caso, transformar) a estas con las coordenadas de salida.
- Son incógnitas: las coordenadas de salida.
- Se fundamentan en los parámetros de orientación interior y exterior.

En definitiva, la resolución de un Modelo Matemático en Fotogrametría exige conocer una “muestra” de las coordenadas de salida de manera que puedan calcularse en primera instancia los parámetros que relacionan a ambos sistemas y, después transformar, mediante dichos parámetros, cualquier punto conocido en el sistema de entrada.

2.7. Breve Descripción de las Herramientas empleadas en el desarrollo del Trabajo Especial de Grado.

2.7.1. Photomodeler®

En este trabajo se utilizó el programa PhotoModeler® para calibrar la cámara, por lo que se hará una breve introducción al mismo, indicando en qué se basa éste para elaborar la calibración.

Es un programa bajo ambiente Windows que permite realizar mediciones y generar modelos 3D a partir de fotografías. Mediante el uso de una cámara métrica o no métrica como dispositivo de entrada, PhotoModeler® permite capturar una gran cantidad de detalles precisos en un tiempo muy corto. A medida que trabaja con más fotos realiza sus respectivos procesamientos.

Para utilizar PhotoModeler®, se toman una o más fotografías de una escena o un objeto. Las fotografías se muestran en la pantalla y el operador marca cada foto con el ratón, localizando y etiquetando las características de interés. PhotoModeler® combina los datos y localiza las características marcadas en tres dimensiones. Las marcas permiten medir con precisión los puntos, líneas, curvas, superficies de los cilindros o en un único y unificado espacio 3D. El resultado es un modelo 3D que pueden ser transferido a cualquier programa de CAD o de gráficos, incluso exportar ortofotos del modelo 3D. (PhotomodelerHelp)

2.7.1.1. Calibración de la Cámara en Photomodeler®

La calibración de la cámara es el proceso de determinación de las características de una cámara para que pueda ser utilizado como un dispositivo de medición.

PhotoModeler® puede utilizar las fotografías tomadas por diferentes tipos de cámaras. Para que PhotoModeler® pueda utilizar la información de la imagen en una fotografía, necesita los valores de algunos parámetros específicos de la cámara; que generalmente son la distancia focal del objetivo, la escala de digitalización (que es el tamaño de formato CCD de un escáner o cámara digital) y el punto principal.

Para obtener una mayor exactitud, en algunos casos, también se utilizan los parámetros que describen las características de distorsión del lente. (PhotomodelerHelp)

La calibración de la cámara es un método para determinar con exactitud los valores de los parámetros de esa cámara. Una vez que se ha calibrado una cámara, ésta proporcionará medidas precisas.

2.7.2. Microstation V8®.

MicroStation® es un programa CAD (*Computer Aided Design* - Diseño Asistido por Computadora) creado para diseñar y elaborar productos en 2 y 3 dimensiones, desarrollado y vendido por **Bentley Systems**. Las últimas versiones del software son liberadas sólo para los sistemas operativos de *Microsoft Windows*, pero históricamente MicroStation estaba disponible para las plataformas *Macintosh* y algunos sistemas operativos *Unix*. MicroStation es un *software* con una plataforma de arquitectura e ingeniería desarrollado por **Bentley Systems**, Incorporated. Entre una serie de funcionalidades genera gráficos vectoriales 2D/3D de objetos y elementos. La versión actual es MicroStation V8i

Formatos de Archivo

Su formato nativo es el formato **DGN**, aunque también puede leer y escribir una variedad de formatos estándar **CAD**, como **DWG** y **DXF**, y producir formatos de salida como: en cuanto a imágenes **JPEG** y **BMP**, animaciones (**AVI**), páginas web 3D en **VRML** y **PDF**.

En sus inicios, MicroStation® se utilizó en los campos de ingeniería y arquitectura, sobre todo para crear planos de construcción, sin embargo, ha evolucionado a través de sus diferentes versiones para incluir avanzados sistemas de modelado y renderizado, que incluye a su vez desarrollo de sólidos, digitalizaciones y animación de fotogramas. Puede proporcionar

ambientes especializados. En el año 2000, Bentley hizo revisiones al formato de archivo **DGN** en la versión V8 para añadir características adicionales como Derechos Digitales e Historia del Diseño – es una capacidad de control de revisión que permite restablecer las revisiones anteriores ya sea globalmente o por selección, y para apoyar una mejor importación y exportación del formato de **Autodesk®** DWG.

2.7.3. Visual Basic®.

Visual Basic® es una herramienta de programación desarrollada por Alan Cooper para *Microsoft*. El lenguaje de programación es un dialecto de BASIC, con importantes agregados. Su primera versión fue presentada en 1991, con la intención de simplificar la programación utilizando un ambiente de desarrollo completamente gráfico que facilitara la creación de interfaces gráficas y, en cierta medida, también la programación misma. Desde el 2001 Microsoft ha propuesto abandonar el desarrollo basado en la *API Win32* y pasar a trabajar sobre un *framework* o marco común de librerías independiente de la versión del sistema operativo .NET Framework, a través de Visual Basic .NET

Visual Basic (Visual Studio) constituye un IDE (entorno de desarrollo integrado o en inglés *Integrated Development Enviroment*) que ha sido empaquetado como un programa de aplicación, es decir, consiste en un editor de código (programa donde se escribe el código fuente), un depurador (programa que corrige errores en el código fuente para que pueda ser bien compilado), un compilador (programa que traduce el código fuente a lenguaje de máquina), y un constructor de interfaz gráfica o GUI (es una forma de programar en la que no es necesario escribir el código para la parte gráfica del programa, sino que se puede hacer de forma visual).

Justificación de su Uso

- Es un lenguaje **RAD** (*Rapid Application Development*).

- Posee una curva de aprendizaje muy rápida.
- Integra el diseño e implementación de formularios de Windows.
- Permite usar con suma facilidad la plataforma de los sistemas Windows dado que tiene acceso prácticamente total a la API de Windows incluidas librerías actuales.
- El código en Visual Basic es fácilmente migrable a otros lenguajes.
- Es un lenguaje muy extendido por lo que resulta fácil encontrar información, documentación y fuentes para los proyectos.
- Fácilmente extensible mediante librerías DLL y componentes ActiveX de otros lenguajes.
- Posibilidad de añadir soporte para ejecución de scripts, VBScript o JScript, en las aplicaciones mediante Microsoft Script Control.
- Acceso a la API multimedia de DirectX (versiones 7 y 8). También está disponible, de forma no oficial, un componente para trabajar con OpenGL 1.1: VBOpenGL type library
- Existe una versión integrada en las aplicaciones de Office, versiones tanto Windows como Mac, que permite programar macros para extender y automatizar funcionalidades en documentos como por ejemplo una hoja de cálculo de EXCEL o una base de datos ACCESS (**VBA**)
- Es un entorno perfecto para realizar pequeños prototipos rápidos de ideas.

Visual Basic for Applications (VBA) en Microstation®

Microstation® incorpora un nuevo lenguaje de programación para el desarrollo de aplicaciones, lo que le da una gran versatilidad a la hora de hacer proyectos personalizados y aumentar la productividad. Este nuevo lenguaje, (VBA), es todo un estándar en el campo de la programación y Microstation® lo incorpora en toda su extensión con un entorno de desarrollo prácticamente igual al de Visual Basic 6.

Visual Basic® y VBA son lenguajes orientados a objetos utilizados por los desarrolladores profesionales de aplicaciones y programadores no habituales. Visual Basic® es la plataforma de desarrollo primaria para gran número de productos comerciales. Visual Basic para Aplicaciones, (VBA), comparte la mayoría de las características de Visual Basic, siendo la mayor diferencia con este la imposibilidad de generar ejecutables con VBA (.exe) o controles ActiveX. Los programas desarrollados con VBA están diseñados para ser ejecutados sobre una aplicación servidor como Microsoft Excel, Microsoft Word, o en nuestro caso, MicroStation V8.

Un programa VBA puede estar compuesto por:
Módulos (Modules): Código fuente organizado en funciones y procedimientos. Los nombres de las macros disponibles para un proyecto, coinciden con los nombres de procedimientos definidos en estos módulos.

Formularios (User Forms): La parte gráfica de los programas, es la interfase de usuario que puede contener además funciones y procedimientos en su interior.

Clases (Class Modules): Contenedores en los que se crean definiciones realizadas por los usuarios de objetos. Suelen contener datos y métodos para trabajar con esos datos. La diferencia fundamental con un módulo, es que se pueden crear instancias de estas clases, tener varios objetos utilizando este código, y los módulos son una única instanciación del código que contienen.

2.8. Aplicación de la Herramienta para el estudio del Patrimonio Cultural.

Para el desarrollo de este proyecto se realizó el levantamiento de una estructura perteneciente al Patrimonio Cultural de la Nación, con la finalidad de poner en funcionamiento la aplicación desarrollada, la elección de este tipo de estructuras es debido a la corriente que viene siendo propuesta por el

Departamento de Ingeniería Geodésica y Agrimensura de la Universidad Central de Venezuela, acerca de la Conservación de los Bienes Patrimoniales del País. Dentro del marco de este tema, es necesario conocer lo que significa el término Patrimonio Cultural, y debido a que la estructura levantada fue el Panteón Nacional, se hará una breve descripción sobre la misma.

2.8.1. Definición de Patrimonio Cultural.

Patrimonio cultural es el conjunto de todos los bienes, materiales (tangibles) o inmateriales (intangibles), que, por su valor propio, deben ser considerados de interés relevante para la permanencia de la identidad y la cultura de un pueblo. Es la herencia cultural propia del pasado, con la que un pueblo vive hoy y que transmitimos a las generaciones futuras.

Según el Capítulo II de la Ley de Protección y Defensa del Patrimonio Cultural, publicada en la Gaceta Oficial Extraordinaria N° 4.623 de fecha 03 de septiembre de 1993, en lo que respecta a los bienes que constituyen el Patrimonio Cultural de la República se observa lo siguiente:

“El Patrimonio Cultural de la República, está constituido por los bienes de interés cultural así declarados que se encuentren en el territorio nacional o que ingresen a él quien quiera que sea su propietario conforme a lo señalado seguidamente:

- 1. Los bienes muebles e inmuebles que hayan sido declarados o se declaren monumentos nacionales.*
- 2. Los bienes inmuebles de cualquier época que sea de interés conservar por su valor histórico, artístico, social o arqueológico que no hayan sido declarados monumentos nacionales.*
- 3. Los bienes muebles de valor histórico o artístico, propiedad del Estado o de otras personas jurídicas de carácter público, que se encuentren en museos nacionales, estatales o municipales o en otros lugares públicos o privados, incluidos los de valor numismático o filatélico.*

4. *Los bienes muebles de cualquier época que sea de interés conservar por su excepcional valor histórico o artístico.*
5. *Las poblaciones y sitios que por sus valores típicos, tradicionales, naturales, históricos, ambientales, artísticos, arquitectónicos o arqueológicos, sean declarados dignos de protección y conservación. Los centros históricos de pueblos y ciudades que lo ameriten y que tengan significación para la memoria urbana.*
6. *Los testimonios históricos y sitios arqueológicos vinculados con el pasado.*
7. *El patrimonio vivo del país, sus costumbres, sus tradiciones culturales, sus vivencias, sus manifestaciones musicales, su folklore, su lengua, sus ritos, sus creencias y su ser nacional.*
8. *El patrimonio documental y bibliográfico, archivos, bibliotecas, fototecas, mapotecas, fonotecas, videotecas, cinematecas y demás instituciones de igual naturaleza; tutelados actualmente por organismos específicos sin desconocer la titularidad de dichos organismos sobre los mismos.*
9. *Los objetos y documentos de personajes de singular importancia en la historia nacional, sus creaciones culturales transcendentales.*
10. *Las obras culturales premiadas nacionalmente.*
11. *La estatuaria monumental y las obras de arte de los cementerios.*
12. *El entorno ambiental o paisajístico -rural o urbanorequerido por los bienes culturales, muebles o inmuebles para su visualidad o contemplación adecuada.*
13. *El patrimonio arqueológico y paleontológico donde quiera que se encuentren.*
14. *Cualquier otro bien de interés cultural que amerite ser declarado como tal.”*

2.8.2. Panteón Nacional.

Es el Panteón Nacional el mausoleo de la patria donde reposan los restos del Libertador Simón Bolívar desde el 28 de Octubre de 1876. Está ubicado dentro del Foro Libertador, entre el Tribunal Supremo de Justicia y la Biblioteca en la Parroquia Altagracia.

Originalmente una modesta iglesia de la orden de los Hermanos Trinitarios, la "Ermita de La Santísima Trinidad", fue fundada por Juan Domingo del Sacramento Infante, se comenzó a construir hacia el año 1744 y fue consagrada en 1783. La Ermita quedó destruida por el terremoto del año 1812, pero fue reconstruida por el Ing. Solano. Luego por Decreto del 27 de Marzo de 1874 Antonio Guzmán Blanco, Presidente de Venezuela, ordenó convertir esta iglesia en Panteón Nacional.

La iglesia fue construida originalmente en estilo neogótico. El pórtico, las ventanas y puertas tienen forma ojival. La distribución interior está compuesta por tres naves separadas por columnas, las cuales soportan las arcadas circulares. El techo está decorado por pinturas realizadas por Tito Salas, que narran las glorias de Simón Bolívar.

En el año 1910, bajo el mandato del General Juan Vicente Gómez, su arquitectura sufrió una modificación para la celebración del Centenario de la Independencia de Venezuela. Los cambios efectuados se limitaron a reconstruir algunos daños y a darle un mayor realce a su interior. Nuevamente fue modificado en el año 1929, bajo la presidencia del Dr. Juan Bautista Pérez, para la celebración del Centenario de la muerte del Libertador. Las transformaciones realizadas fueron radicales, al punto que se podría afirmar que fue reconstruido. La fachada principal fue modificada en el estilo barroco y las dos torres originales pasaron a ser tres, siendo la del centro una torre más alta. Se le dio mayor

riqueza arquitectónica a las capillas, el Sarcófago del Libertador fue cambiado por uno más lujoso y los monumentos fueron reubicados.



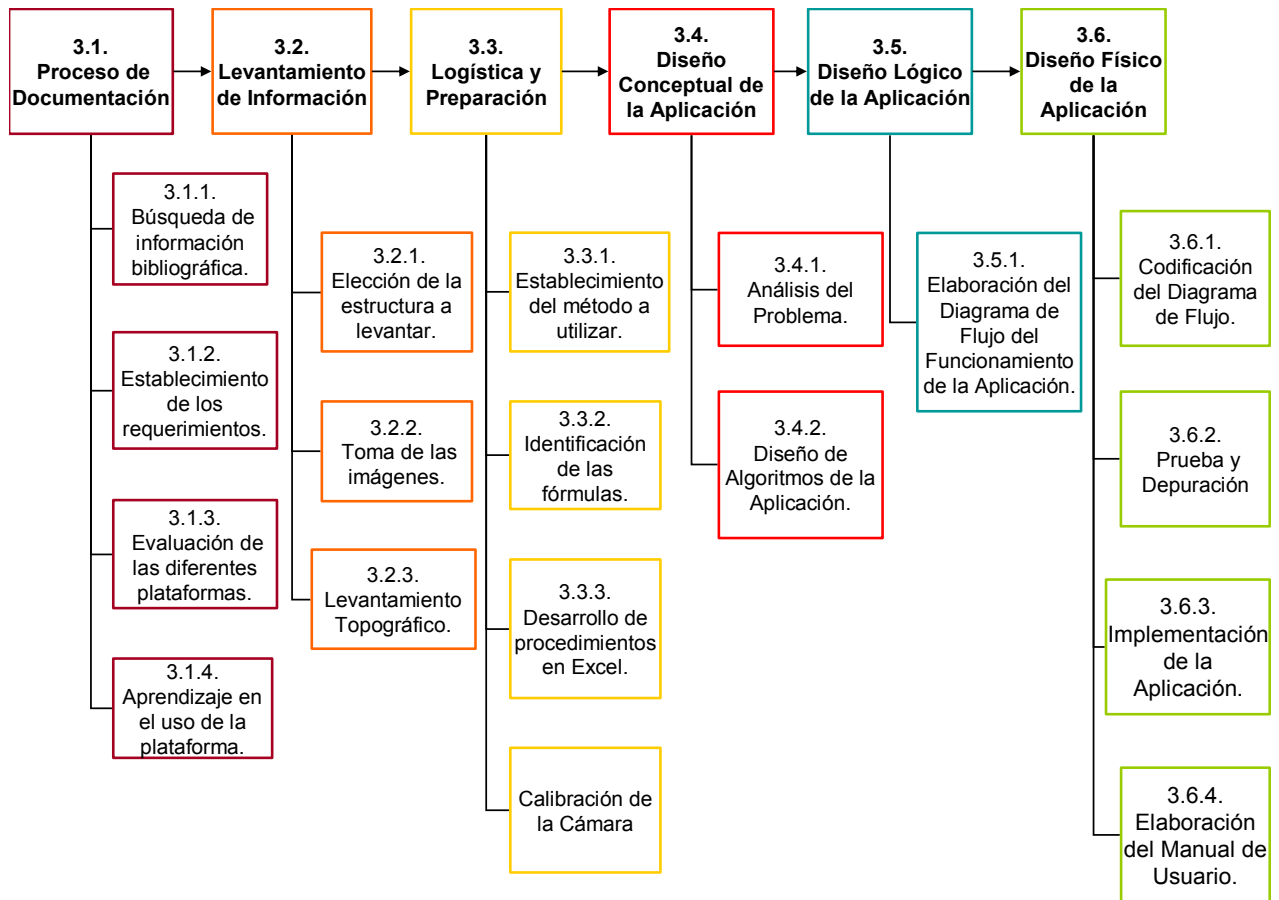
*Figura 28. Iglesia de la Santísima Trinidad
(Venciclopedia)*



*Figura 29. Panteón Nacional de José Gregorio Zolano.
(Venciclopedia)*

CAPÍTULO III MÉTODO

En el desarrollo de cualquier proyecto es fundamental seleccionar una metodología que se ajuste a las necesidades del mismo, para así obtener los resultados más adecuados que permitan alcanzar los objetivos planteados. En este Trabajo Especial Grado las fases metodológicas son las que se ilustran en el siguiente esquema:



*Esquema 1. Etapas del Método
(Elaboración Propia).*

3.1. Proceso de Documentación.

3.1.1. Búsqueda de Información Bibliográfica.

En esta etapa se realizó la recopilación de información referencial, relacionada con el área de trabajo, los cuales sustentarán el método desarrollado. Con esta información se conformó el marco teórico, mediante investigaciones en libros, manuales, Internet y consultas con profesores conocedores del tema.

También se averiguó sobre las diferentes plataformas disponibles para desarrollar la herramienta y las bondades que cada una presentaba.

3.1.2. Establecimiento de los Requerimientos.

Durante esta etapa se definieron las necesidades de la herramienta que se desarrollaría, es decir, establecer el por qué del programa y para qué el desarrollo del mismo, y en base a esto se concretó cual sería la funcionalidad que tendría. La recaudación de los elementos antes descritos se logró mediante varias entrevistas con el tutor del presente trabajo, donde se evaluaron las deficiencias existentes de los programas actuales y las necesidades de los usuarios, lo que permitió elaborar el planteamiento del problema.

En base a esto, fue posible la definición de las condiciones que la herramienta debe presentar, las cuales son:

- Debe ser posible la captura de coordenadas imagen mediante el cursor del ordenador.
- También las coordenadas imagen pueden ser cargadas desde un archivo existente, en formato texto.
- Debe permitir mover la (s) imagen (es) según los parámetros de orientación interior desarrollados.
- Permita la observación del par de imágenes mediante un estereoscopio de espejos.

- Puedan ser observados los valores obtenidos del proceso de orientación.
- Acceda a la obtención de coordenadas tridimensionales del modelo.
- Sea aplicable tanto para imágenes terrestres como para imágenes aéreas.
- Sea desarrollado en una plataforma que permita la digitalización de elementos, con fines cartográficos.

En base a estas condiciones surgió el dilema de la elección de la plataforma de desarrollo de la herramienta, las opciones posibles y el análisis de ellas se presenta a continuación.

3.1.3. Evaluación de las Diferentes Plataformas.

Se buscó en el mercado las diferentes plataformas disponibles para crear la herramienta, por lo que hubo que analizar las bondades de cada uno de ellas, en base a los requerimientos establecidos y los alcances que serían posible obtener.

En primera instancia la plataforma considerada fue la de Macromedia Flash®, ya que allí el tutor se encontraba desarrollando la herramienta, luego de realizar el análisis de ventajas y desventajas de las posibles opciones, se concluyó que éste no era el que ofrecía los mayores beneficios, por lo que se comenzó a trabajar en Microstation®, en el módulo de Visual Basic for Applications.

Los criterios bajo los cuales se analizaron estas plataformas se presentan en la siguiente tabla.

	Macromedia Flash Player	Visual Basic	Microstation
Desarrollo de Matrices	D	B	N/A
Tratamiento de Imágenes	B	R	R
Construcción de Proyección Cónica	D	B	B
Ubicación de Estaciones de Toma	D	N/A	B
Tratamiento de Coordenadas Tridimensionales	D	B	B
Ambiente de Trabajo	B	B	B
Capacidad de Digitalización	D	Necesita Desarrollo	B*

B*: Excelente **R**: Regular
B: Bueno **D**: Deficiente

*Tabla 2. Comparación de las Posibles Plataformas de Trabajo
(Prof. Julián García)*

Luego de analizar cada uno de estos aspectos, se concluyó que la mejor opción era utilizar Visual Basic® for Applications en Microstation®, ya que es más práctico, además de estar orientado a fines cartográficos, que es lo que se quiere lograr, y permite trabajar con coordenadas terreno una vez realizada la orientación relativa, ya que la orientación absoluta se logra utilizando las bondades que presenta la plataforma para trabajar con proyecciones cónicas.

En cuanto a Visual Basic®, su elección no sólo se debe a que es el lenguaje de programación de Microstation®, sino que trabajar con matrices o arreglos vectoriales presenta una ventaja con respecto a la otra plataforma, y esto es básicamente la principal razón, ya que el

compendio de formulas que se utiliza, está basado en un 90% en matrices; esto sin mencionar que para una persona con pocos conocimientos en programación, se considera que éste es uno de los lenguajes más sencillos que presenta mucho potencial.

3.1.4. Aprendizaje en el Uso de la Plataforma.

En primer lugar fue necesario el adiestramiento en Visual Basic®, mediante la lectura de manuales y tutoriales hallados vía Internet, además de la práctica utilizando ejemplos allí encontrados, lo que permitió, poco a poco, la familiarización con el lenguaje de programación, dirigido esencialmente a los elementos que eran necesarios conocer para el desarrollo de la herramienta.

Una vez logrado ésto, se procedió a trabajar con Microstation®, para saber cómo importar imágenes, introducir datos y la puesta en marcha de la aplicación generada en ese ambiente. Para conocer acerca de las funciones que presenta este programa, fueron necesarias no sólo la lectura del manual respectivo, sino diversas reuniones con el tutor del proyecto, quién fue guiando a lo largo de este proceso.

3.2. Levantamiento de Información.

El Trabajo de Campo consistió en el levantamiento fotogramétrico terrestre de una estructura con elementos arquitectónicos.

Dentro del marco de la Conservación de los Bienes Patrimoniales que viene fomentando la Universidad Central de Venezuela, específicamente el Departamento de Ingeniería Geodésica y Agrimensura, fue recomendado por el tutor de este proyecto que el elemento a levantar fuera de relevancia en este tema, como alguna iglesia o estructura que haya sido edificada hace varios años y posea valor patrimonial para el país.

3.2.1. Elección de la Estructura a levantar.

Debido a lo mencionado anteriormente, inicialmente se planteo la opción de hacer el levantamiento de:

- El Panteón Nacional, ubicado en la Avenida Panteón de Caracas.

La edificación fue fotografiada, en una visita previa de campo, para establecer cuál sería la forma más conveniente para la toma de las imágenes y si era factible realizar este levantamiento, una de las imágenes tomadas durante esta visita se muestra a continuación (figura 30), para analizar que tan nítida era capaz de capturar la cámara a la estructura:



*Figura 30. Imagen del Panteón Nacional
(Elaboración Propia)*

Una vez observada y analizadas la estructura con el tutor del proyecto, se decidió que esta era una buena opción por diversas razones:

- En primer lugar por el valor patrimonial que representa para la nación.

- Recientemente la estructura del Panteón se afectó debido a movimientos telúricos, lo que causó que la cúpula se debilitara y doblara, esto motivado a que no ha sido restaurada, por lo que quizás con este levantamiento sea posible proveer a las autoridades de mayor información para exigir su reparación.
- A pesar de que el lugar donde se encuentra ubicado el panteón es de gran peligrosidad (debido a la delincuencia), fue posible conseguir asistencia del personal que allí labora, por lo que era factible realizar el levantamiento.
- Durante el análisis de las imágenes se pudo observar que la estructura posee una visual completa.
- Por último, los colores del material del Panteón facilitan la ubicación de puntos sobre la estructura

Por las razones expuestas anteriormente la decisión fue levantar el Panteón Nacional.

3.2.2. Toma de las Imágenes.

- En primer lugar se midió la distancia existente entre la estructura y el lugar desde donde se realizaría la adquisición del par de imágenes.
- Se estableció cuál sería la distancia entre cada estación de toma (base x), la cual se corresponde con aproximadamente el 20% de la distancia medida anteriormente. Siempre cuidando que desde los puntos o vértices de toma existiera visual completa hacia el Panteón.

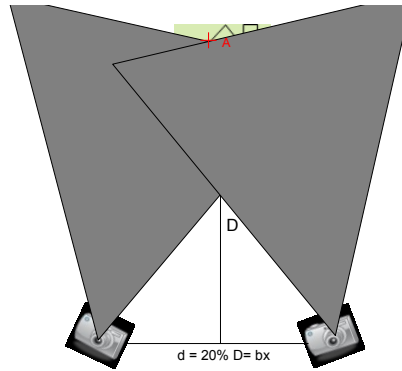


Figura 31. Cálculo de la base x para la toma del par estereoscópico
(Elaboración Propia).

- Materialización de las estaciones de toma: Se colocaron los clavos pk (punto kilométrico) en los 2 vértices seleccionados.
- Toma de Fotografías:
 - Para la toma de imágenes se empleó un trípode de estación total y una base con nivel de burbuja (ojo de pollo).
 - La estructura no se observaba completa en la imagen con la cámara en posición horizontal, por lo que las fotos se tomaron de manera vertical. Para esto en cada vértice fue necesario centrar el eje óptico de la cámara en el punto de toma y nivelar la base de la mejor manera posible, ya que con la cámara en posición vertical esto resultaba complicado.
 - Las imágenes fueron tomadas en dirección hacia el Panteón Nacional, esto se realizó de esta forma para asegurar la resección espacial de los puntos en las imágenes, a pesar de que no es la forma tradicional de adquisición de fotografías con fines fotogramétricos.
 - Se verificó que la cámara no tuviera ninguna variación de aumento en la imagen.

- Para intentar evitar las vibraciones, a pesar de que la cámara se sostenía manualmente, se empleó el temporizador de la cámara con un tiempo de espera de 10 segundos antes de cada captura.
- Se capturaron varias imágenes desde cada vértice para evitar errores y poder elegir la mejor toma.

Los vértices o estaciones de toma se ilustran en la siguiente imagen, así como puntos de referencia medidos durante el levantamiento topográfico.



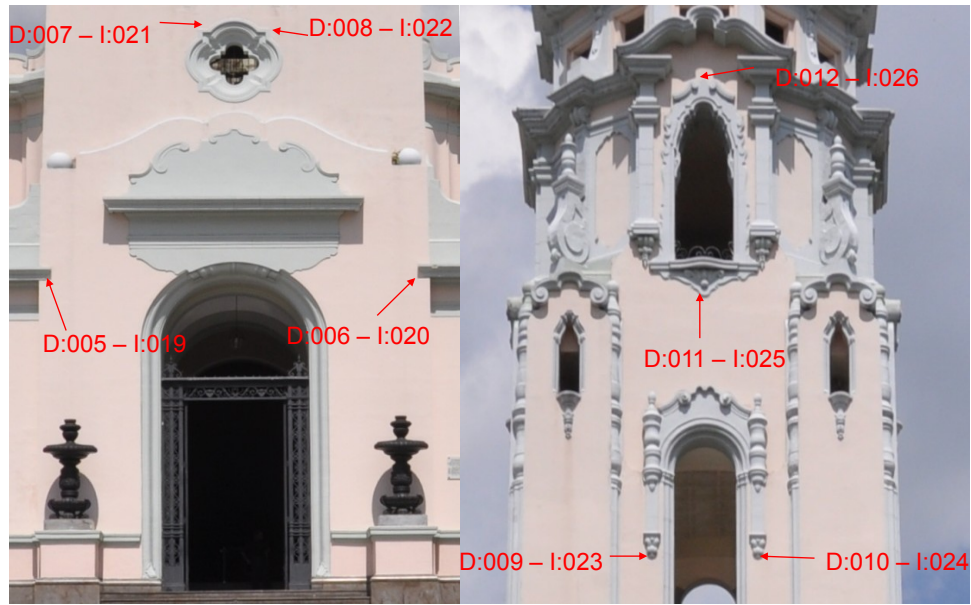
*Figura 32. Croquis de los Puntos de Toma
(Elaboración Propia)*

3.2.3. Levantamiento Topográfico.

Para el levantamiento topográfico se empleó una estación total **STONEX** (precisión angular 2" y lectura 1") alcance en distancia con lectura láser hasta 300 m sobre cualquier superficie.

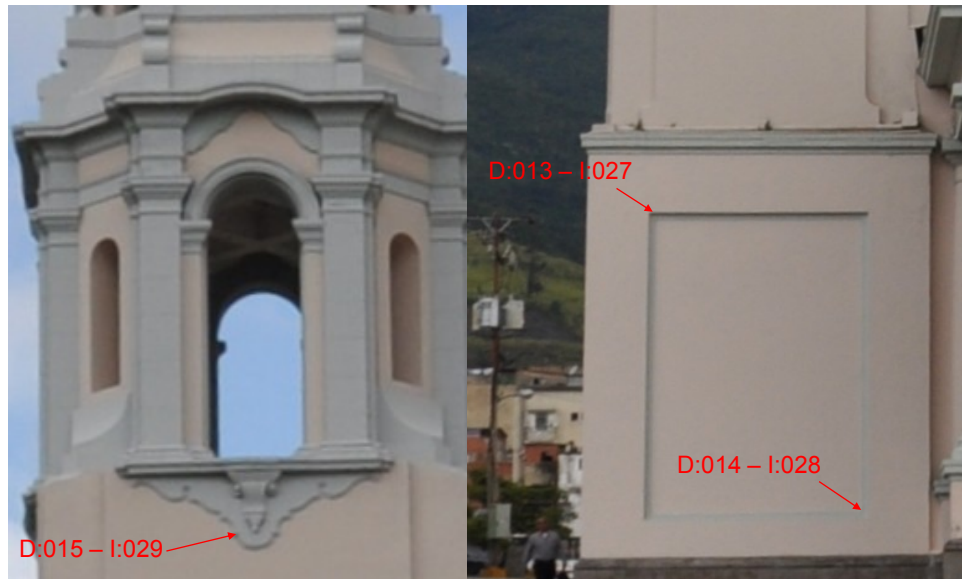
Se colocó y niveló la estación en cada vértice y empleando el láser de la misma fue posible medir rápidamente puntos de control sobre la estructura del Panteón. Se midió aproximadamente 13 puntos, desde ambos vértices, para obtener un total de 26 puntos, sin contar con los puntos de estación medidos.

El croquis de puntos medidos sobre la estructura fueron los siguientes:



D: en la Imagen Derecha
I: en la Imagen Izquierda

Figura 33. Croquis de los puntos medidos sobre la zona central de la estructura.
(Elaboración Propia)



D: en la Imagen Derecha
I: en la Imagen Izquierda

Figura 34. Croquis de los puntos medidos sobre la zona izquierda de la estructura
(Elaboración Propia)



D: en la Imagen Derecha
I: en la Imagen Izquierda

Figura 35. Croquis de los puntos medidos sobre la zona derecha de la estructura.
(Elaboración Propia)

3.3. Logística y Preparación.

3.3.1. Establecimiento del Método a Utilizar.

En esta etapa, fue necesario definir el método a emplear para la elaboración de las orientaciones, para esto se recurrió a la información referencial o bibliográfica hallada previamente, según el autor Juan Antonio Pérez Álvarez, en su guía de “Apuntes de Fotogrametría II” existen dos formas de llevar a cabo la Orientación Externa (Orientación Absoluta y Relativa):

- En un solo paso:
 - Mediante la Condición de Colinealidad.
- En dos pasos:
 - Mediante la Condición de Colinealidad.
 - Mediante la Condición de Coplaneidad:
 - Por empalme de fotos consecutivas

➤ Pares de Fotos Independientes.

Se analizó cada uno de estos casos durante la elaboración del Marco Teórico y se seleccionó como mejor método el de Orientación Relativa en dos pasos, mediante la Condición de Coplaneidad por Empalme de Fotos Consecutivas, cuya explicación se encuentran previamente ubicadas en el Marco Teórico Correspondiente.

Este método se estableció principalmente, porque con él es necesario mover solo una imagen del modelo, lo que facilita la programación y aplicación de las fórmulas en la herramienta, ya que los valores de orientación relativa de la placa izquierda se mantienen en cero, lo que disminuye el número y complejidad de las fórmulas.

3.3.2. Identificación de las Fórmulas

Una vez que se conoció la metodología de trabajo, se procedió a extraer las fórmulas respectivas, de esta manera fue posible la identificación de las variables necesarias, tales como los datos de partida y los resultados a obtener.

Los valores de inicio deben ser las coordenadas imagen del modelo, así como los puntos de control (coordenadas terreno), identificados tanto en el terreno como en las imágenes tomadas. Y los resultados a obtener son: en el caso de la orientación relativa, los parámetros son los valores de la base z (b_z) y la base y (b_y) así como los valores de los ángulos omega, phi y kappa de la placa derecha, ya que como se dijo anteriormente, los de la izquierda se mantienen en cero. Y en el caso de la orientación absoluta, se obtienen las coordenadas tridimensionales de los elementos del modelo.

Como se explicó y esquematizó en el capítulo anterior, las ecuaciones a utilizar se dividen en: Las ecuaciones de Condición de Coplaneida, las cuales se aplican para la Orientación Relativa, para el Cálculo de

Coordenadas Modelo y para la Orientación Absoluta. Por lo que las fórmulas de las mismas se indican a continuación:

➤ **Para la Condición de Coplaneidad**

Partiendo de la siguiente ecuación descrita en el capítulo anterior:

$$\Delta = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ bx & by & bz & 1 \\ \bar{x}' & \bar{y}' & \bar{z}' & 1 \\ x_2 & y_2 & z_2 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} bx & by & bz \\ \bar{x}' & \bar{y}' & \bar{z}' \\ x_2 & y_2 & z_2 \end{bmatrix} = 0$$

Restando la primera fila de la última:

$$\Delta = \begin{bmatrix} bx & by & bz \\ \bar{x}' & \bar{y}' & \bar{z}' \\ x_2 - bx & y_2 - by & z_2 - bz \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} bx & by & bz \\ \bar{x}' & \bar{y}' & \bar{z}' \\ \bar{x}'' & \bar{y}'' & \bar{z}'' \end{bmatrix} = 0$$

Donde (x_2, y_2, z_2) son las coordenadas del punto p'' respecto a O_2 en el sistema modelo.

La rotación de cada una de las cámaras vedrá dada por:

$$\begin{bmatrix} \bar{x}' \\ \bar{y}' \\ \bar{z}' \end{bmatrix} = [R_1] \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} \qquad \begin{bmatrix} \bar{x}'' \\ \bar{y}'' \\ \bar{z}'' \end{bmatrix} = [R_2] \begin{bmatrix} x'' \\ y'' \\ z'' \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \bar{x}' \\ \bar{y}' \\ \bar{z}' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11}^i & a_{21}^i & a_{31}^i \\ a_{21}^i & a_{22}^i & a_{23}^i \\ a_{31}^i & a_{23}^i & a_{33}^i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} \qquad \begin{bmatrix} \bar{x}'' \\ \bar{y}'' \\ \bar{z}'' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11}^d & a_{21}^d & a_{31}^d \\ a_{21}^d & a_{22}^d & a_{23}^d \\ a_{31}^d & a_{23}^d & a_{33}^d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x'' \\ y'' \\ z'' \end{bmatrix}$$

La condición de coplaneidad puede expresarse de la forma siguiente:

$$\Delta = \begin{bmatrix} x' & y' & z' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & bz & -by \\ -bz & 0 & bx \\ by & -bx & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x'' \\ y'' \\ z'' \end{bmatrix} = 0$$

$$\Delta = [x' \quad y' \quad z'] [R_1^T] \begin{bmatrix} 0 & bz & -by \\ -bz & 0 & bx \\ by & -bx & 0 \end{bmatrix} [R_2] \begin{bmatrix} x'' \\ y'' \\ z'' \end{bmatrix} = 0$$

Sustituyendo ambas expresiones en la ecuación anterior llegaremos a:

$$\Delta = [x' \quad y' \quad z'] \begin{bmatrix} a_{11}^i & a_{21}^i & a_{31}^i \\ a_{21}^i & a_{22}^i & a_{23}^i \\ a_{31}^i & a_{23}^i & a_{33}^i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & bz & -by \\ -bz & 0 & bx \\ by & -bx & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{11}^d & a_{21}^d & a_{31}^d \\ a_{21}^d & a_{22}^d & a_{23}^d \\ a_{31}^d & a_{23}^d & a_{33}^d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x'' \\ y'' \\ z'' \end{bmatrix} = 0$$

Linealización de la Ecuación de Coplaneidad

Partiendo de la expresión de la ecuación de coplaneidad y dividiendo la primera fila de esta expresión por bx , y llamando $\beta_y = \frac{b_y}{b_x}$, $\beta_z = \frac{b_z}{b_x}$ obtendremos:

$$\Delta = \begin{bmatrix} 1 & \beta_y & \beta_z \\ \frac{x'}{x''} & \frac{y'}{y''} & \frac{z'}{z''} \\ \frac{x'}{x''} & \frac{y'}{y''} & \frac{z'}{z''} \end{bmatrix}$$

Desarrollando el determinante tendremos:

$$\Delta = (\overline{y'z''} - \overline{z'y''}) + \beta_y (\overline{z'x''} - \overline{x'z''}) + \beta_z (\overline{x'y''} - \overline{y'x''}) = 0$$

Siendo los coeficientes de la matriz de rotación del proyector derecho e izquierdo los siguientes:

$$\begin{array}{ll} a_{11}^i = \cos\varphi_1 \cos k_1 & a_{11}^d = \cos\varphi_2 \cos k_2 \\ a_{12}^i = -\cos\varphi_1 \sen k_1 & a_{12}^d = -\cos\varphi_2 \sen k_2 \\ a_{13}^i = \sen\varphi_1 & a_{13}^d = \sen\varphi_2 \\ a_{21}^i = \cos\omega_1 \sen k_1 + \sen\omega_1 \sen\varphi_1 \cos k_1 & a_{21}^d = \cos\omega_2 \sen k_2 + \sen\omega_2 \sen\varphi_2 \cos k_2 \\ a_{22}^i = \cos\omega_1 \cos k_1 - \sen\omega_1 \sen\varphi_1 \sen k_1 & a_{22}^d = \cos\omega_2 \cos k_2 - \sen\omega_2 \sen\varphi_2 \sen k_2 \\ a_{23}^i = -\sen\omega_1 \cos\varphi_1 & a_{23}^d = -\sen\omega_2 \cos\varphi_2 \\ a_{31}^i = \sen\omega_1 \sen k_1 - \cos\omega_1 \sen\varphi_1 \cos k_1 & a_{31}^d = \sen\omega_2 \sen k_2 - \cos\omega_2 \sen\varphi_2 \cos k_2 \\ a_{32}^i = \sen\omega_1 \cos k_1 + \cos\omega_1 \sen\varphi_1 \sen k_1 & a_{32}^d = \sen\omega_2 \cos k_2 + \cos\omega_2 \sen\varphi_2 \sen k_2 \end{array}$$

$$a_{33}^i = \cos\omega_1 \cos\varphi_1$$

$$a_{33}^d = \cos\omega_2 \cos\varphi_2$$

Aplicando el desarrollo de Taylor a la expresión anterior (Δ) hasta el primer término, tendremos:

$$\begin{aligned} \Delta = (\Delta)_o &+ \left(\frac{\delta\Delta}{\delta\beta_y}\right)_o d\beta_y + \left(\frac{\delta\Delta}{\delta\beta_z}\right)_o d\beta_z + \left(\frac{\delta\Delta}{\delta\omega_1}\right)_o d\omega_1 + \left(\frac{\delta\Delta}{\delta\varphi_1}\right)_o d\varphi_1 + \left(\frac{\delta\Delta}{\delta k_1}\right)_o dk_1 \\ &+ \left(\frac{\delta\Delta}{\delta\omega_2}\right)_o d\omega_2 + \left(\frac{\delta\Delta}{\delta\varphi_2}\right)_o d\varphi_2 + \left(\frac{\delta\Delta}{\delta k_2}\right)_o dk_2 \end{aligned}$$

Donde $(\Delta)_o$ es el valor de la ecuación general, particularizada para valores aproximados de β_y , β_z , ω_1 , φ_1 , k_1 , ω_2 , φ_2 , k_2 y los términos $\left(\frac{\delta\Delta}{\delta\beta_y}\right)_o$, $\left(\frac{\delta\Delta}{\delta\beta_z}\right)_o$, etc..... resultado de la aproximación.

Coeficientes de la Función Lineal Aproximada

$$\frac{\delta\Delta}{\delta\beta_y} = \bar{x}''\bar{z}' - \bar{x}'\bar{z}'' = B_{11}$$

$$\frac{\delta\Delta}{\delta\beta_z} = \bar{x}'\bar{y}'' - \bar{x}''\bar{y}' = B_{12}$$

$$\frac{\delta\Delta}{\delta\omega_1} = -(\bar{z}''\bar{z}' + \bar{y}'\bar{y}'') + \beta y(\bar{x}''\bar{y}') + \beta z(\bar{x}''\bar{z}') = B_{13}$$

$$\frac{\delta\Delta}{\delta\varphi_1} = (\bar{z}''A_{11} + \bar{y}''A_{12}) + \beta y(\bar{x}''A_{12} - \bar{z}''A_{13}) + \beta z(\bar{y}''A_{13} - \bar{x}''A_{11}) = B_{14}$$

Donde:

$$x'(\text{sen}\omega_1 \cos\varphi_1 \cos k_1) + y'(-\text{sen}\omega_1 \cos\varphi_1 \text{sen} k_1) + c(\text{sen}\omega_1 \text{sen}\varphi_1) = A_{11}$$

$$x'(-\cos\omega_1 \cos\varphi_1 \cos k_1) + y'(\cos\omega_1 \cos\varphi_1 \text{sen} k_1) + c(-\cos\omega_1 \text{sen}\varphi_1) = A_{12}$$

$$x'(-\text{sen}\varphi_1 \text{cos}k_1) + y'(\text{sen}\varphi_1 \text{sen}k_1) + c(\text{cos}\varphi_1) = A_{13}$$

$$\frac{\delta\Delta}{\delta k_1} = (\bar{z}''A_{14} - \bar{y}''A_{15}) + \beta y(\bar{x}''A_{15} - \bar{z}''A_{16}) + \beta z(\bar{y}''A_{16} - \bar{x}''A_{14}) = B_{15}$$

Donde:

$$a_{22}^i x' - a_{21}^i y' = A_{14}$$

$$a_{32}^i x' - a_{31}^i y' = A_{15}$$

$$a_{12}^i x' - a_{11}^i y' = A_{16}$$

$$\frac{\delta\Delta}{\delta\omega_2} = (\bar{z}''\bar{z}' + \bar{y}''\bar{y}'A_{15}) + \beta y(\overline{-\bar{y}''x'}) + \beta z(-\bar{z}''\bar{x}') = B_{16}$$

$$\frac{\delta\Delta}{\delta\varphi_2} = (-\bar{z}'A_{21} + \bar{y}'A_{22}) + \beta y(\bar{z}'A_{23} - \bar{x}'A_{22}) + \beta z(-\bar{y}'A_{23} + \bar{x}'A_{21}) = B_{17}$$

Donde:

$$x''(\text{sen}\omega_2 \text{cos}\varphi_2 \text{cos}k_2) + y''(-\text{sen}\omega_2 \text{cos}\varphi_2 \text{sen}k_2) + c(\text{sen}\omega_2 \text{sen}\varphi_2) = A_{21}$$

$$x''(-\text{cos}\omega_2 \text{cos}\varphi_2 \text{cos}k_2) + y''(\text{cos}\omega_2 \text{cos}\varphi_2 \text{sen}k_2) + c(-\text{cos}\omega_2 \text{sen}\varphi_2) = A_{22}$$

$$x''(-\text{sen}\varphi_2 \text{cos}k_2) + y''(\text{sen}\varphi_2 \text{sen}k_2) + c(\text{cos}\varphi_2) = A_{23}$$

$$\frac{\delta\Delta}{\delta k_2} = (\bar{y}'A_{25} - \bar{z}'A_{24}) + \beta y(\bar{z}'A_{26} - \bar{x}'A_{25}) + \beta z(\bar{x}'A_{24} - \bar{y}'A_{26}) = B_{18}$$

Donde:

$$a_{22}^d x'' - a_{21}^d y'' = A_{24}$$

$$a_{32}^d x'' - a_{31}^d y'' = A_{25}$$

$$a_{12}^d x'' - a_{11}^d y'' = A_{26}$$

Quedando el Sistema de Ecuaciones Indirecta de la Forma:

$$\begin{bmatrix} B_{11}^1 & B_{12}^1 & B_{13}^1 & B_{14}^1 & B_{15}^1 & B_{16}^1 & B_{17}^1 & B_{18}^1 \\ B_{11}^2 & B_{12}^2 & B_{13}^2 & B_{14}^2 & B_{15}^2 & B_{16}^2 & B_{17}^2 & B_{18}^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ B_{11}^n & B_{12}^n & B_{13}^n & B_{14}^n & B_{15}^n & B_{16}^n & B_{17}^n & B_{18}^n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d\beta y \\ d\beta z \\ d\omega_1 \\ d\varphi_1 \\ dk_1 \\ d\omega_2 \\ d\varphi_2 \\ dk_2 \end{bmatrix} + [-(\Delta)_0] = 0$$

Se miden las coordenadas imagen de un número de puntos ($n \geq 5$) en dos fotogramas consecutivos y se fijan valores aproximados para cada elemento de orientación.

Según la teoría de mínimos cuadrados: $\Phi = [V^T][V]$; $\frac{\delta\Phi}{\delta x} = \text{mínimo}$.

$$[X] = ([B^T][B])^{-1}[B][-(\Delta)_0]$$

Siendo los parámetros de orientación tras la primera iteración:

$$\begin{aligned} \beta y^i &= \beta y_a^i + d\beta y^i & \beta z^i &= \beta z_a^i + d\beta z^i \\ \omega_1^i &= \omega_{1a}^i + d\omega_1^i & \omega_2^i &= \omega_{2a}^i + d\omega_2^i \\ k_1^i &= k_{1a}^i + dk_1^i & k_2^i &= k_{2a}^i + dk_2^i \\ \varphi_1^i &= \varphi_{1a}^i + d\varphi_1^i & \varphi_2^i &= \varphi_{2a}^i + d\varphi_2^i \end{aligned}$$

➤ Orientación Relativa.

Tomando en cuenta la **Condición de Coplaneidad** para el caso de **Empalme de Fotos Consecutivas**, supongamos que el sistema de referencia del modelo coincide con el sistema de referencia asociado a la siguiente fotografía. Van a usarse componente de la base y elementos de rotación del haz derecho.

Por tanto $\omega_1 = \varphi_1 = \kappa_1 = 0$; la condición de coplaneidad quedará de la forma:

$$\Delta = [x' \quad y' \quad z'] \begin{bmatrix} 0 & bz & -by \\ -bz & 0 & bx \\ by & -bx & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x'' \\ y'' \\ z'' \end{bmatrix} = 0$$

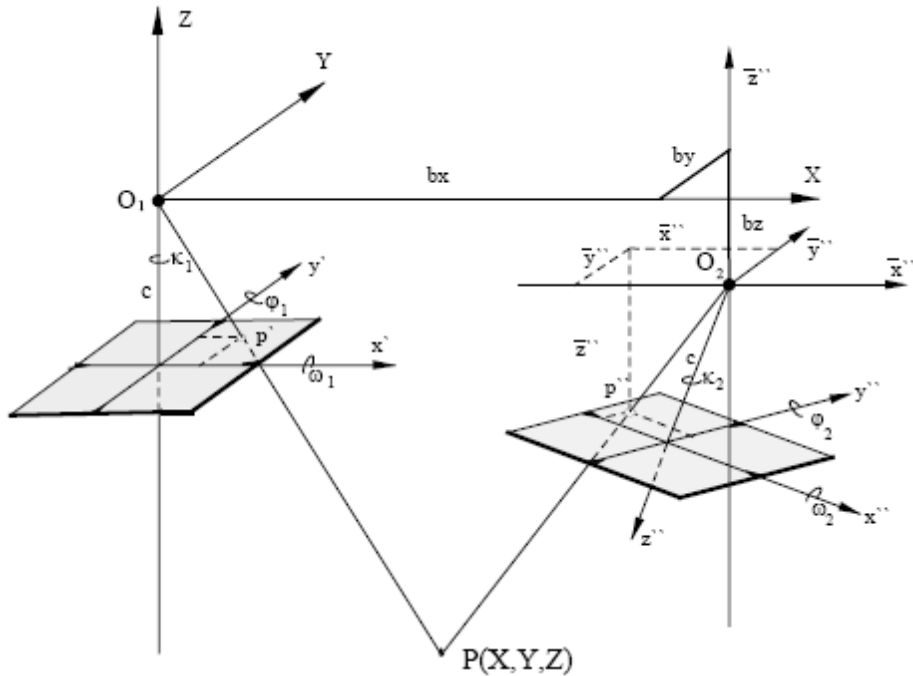


Figura 36: Orientación Relativa por Empalme de Fotos Consecutivas. (Pérez Álvarez, 2001)

Sustituyendo en la expresión anteriormente vista de la condición la matriz de rotación de la placa derecha, tendremos:

$$\Delta = [x' \quad y' \quad z'] \begin{bmatrix} 0 & bz & -by \\ -bz & 0 & bx \\ by & -bx & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{11}^d & a_{21}^d & a_{31}^d \\ a_{21}^d & a_{22}^d & a_{23}^d \\ a_{31}^d & a_{23}^d & a_{33}^d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x'' \\ y'' \\ z'' \end{bmatrix} = 0$$

Incógnitas a resolver: $\beta_y, \beta_z, \omega_2, \varphi_2, \kappa_2$

Llamando $\beta_y = \frac{b_y}{b_x}$; $\beta_z = \frac{b_z}{b_x}$ (Componentes angulares de la base)

$$\Delta = [x' \quad y' \quad z'] \begin{bmatrix} 0 & \beta_z & -\beta_y \\ -\beta_z & 0 & 1 \\ \beta_y & -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{11}^d & a_{21}^d & a_{31}^d \\ a_{21}^d & a_{22}^d & a_{23}^d \\ a_{31}^d & a_{23}^d & a_{33}^d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x'' \\ y'' \\ z'' \end{bmatrix} = 0$$

Linealizando la ecuación, como se demuestra en el desarrollo anterior donde se explica la condición de coplaneidad, se obtienen los coeficientes de la función lineal aproximada, pero en este caso, por asumirse las rotaciones de la placa izquierda como cero, los coeficientes B_{13}, B_{14} y B_{15}

no se toman en cuenta para formar la matriz $[B]$ del sistema de ecuaciones indirecto.

Conociendo esto, el sistema de ecuaciones indirecto queda de la siguiente forma:

$$\begin{bmatrix} B_{11}^1 & B_{12}^1 & B_{16}^1 & B_{17}^1 & B_{18}^1 \\ B_{11}^2 & B_{12}^2 & B_{16}^2 & B_{17}^2 & B_{18}^2 \\ B_{11}^n & B_{12}^n & B_{16}^n & B_{17}^n & B_{18}^n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d\beta y \\ d\beta z \\ d\omega_2 \\ d\varphi_2 \\ dk_2 \end{bmatrix} + [-(\Delta)_0] = 0$$

Para poder resolver esto, como se dijo anteriormente, es necesario conocer las coordenadas imagen de mínimo 5 puntos ($n \geq 5$) en dos fotogramas consecutivos. Este sistema se resolverá por el método de mínimos cuadrados, obteniéndose así los parámetros (incógnitas) tras la primera iteración:

$$\begin{aligned} \beta y^i &= \beta y_a^i + d\beta y^i & \beta z^i &= \beta z_a^i + d\beta z^i \\ \omega_2^i &= \omega_{2a}^i + d\omega_2^i & \varphi_2^i &= \varphi_{2a}^i + d\varphi_2^i \\ k_2^i &= k_{2a}^i + dk_2^i \end{aligned}$$

Tras varias iteraciones se obtendrá la solución final, utilizando para cada iteración los parámetros calculados anteriormente.

Cálculo de las Coordenadas Modelo

Una vez hallados los parámetros de la orientación relativa, es necesario hallar las coordenadas del Modelo Estereoscópico, teniendo los valores de βy , βz , ω_2 , φ_2 , k_2 :

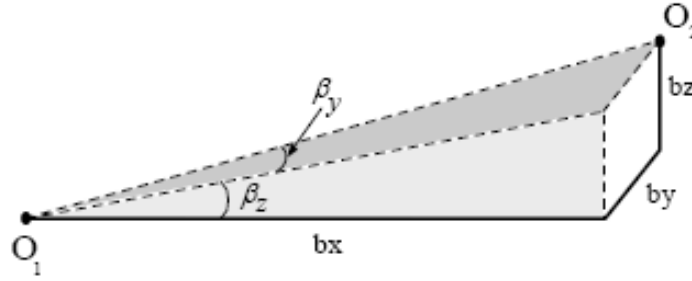


Figura 37: Componentes de la Base.
(Pérez Álvarez, 2001)

Conociendo: $\beta_y = \frac{b_y}{b_x}$; $\beta_z = \frac{b_z}{b_x}$ se obtiene: $b_y = b_x \beta_y$; $b_z = b_x \beta_z$;

donde b_x es la base aproximada entre las fotografías.

Partiendo del mismo sistema de coordenadas, con origen en O_1 , vamos a calcular las coordenadas modelo.

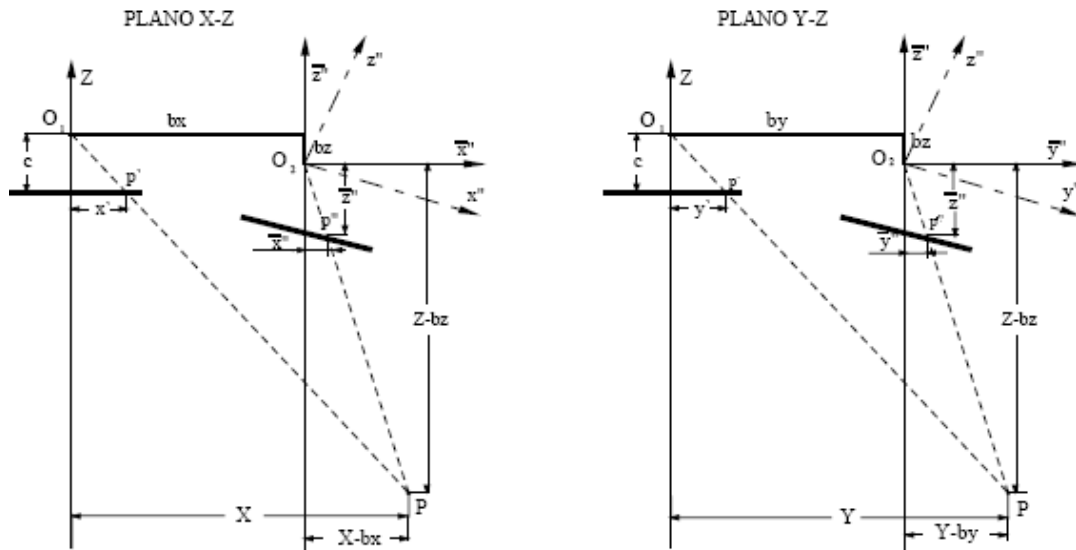


Figura 38: Cálculo de Coordenadas Modelo.
(Pérez Álvarez, 2001)

Se tienen las siguientes relaciones:

$$\frac{\overline{O_1 P}}{\overline{O_1 P'}} = \frac{x}{x'} = \frac{y}{y'} = \frac{z}{c} = \lambda$$

$$\frac{\overline{O_2 P}}{\overline{O_2 P''}} = \frac{x - b_x}{x''} = \frac{y - b_y}{y''} = \frac{z - b_z}{z''} = \mu$$

Haz izquierdo	Haz derecho
$X = \lambda x'$	$X = \mu \bar{x}'' + bx$
$Y = \lambda y'$	$Y = \mu \bar{y}'' + by$
$Z = \lambda c$	$Z = \mu \bar{z}'' + bz$

Pudiéndose establecer por punto un total de tres ecuaciones como sigue:

$$X = \lambda x' = \mu \bar{x}'' + bx \quad (1)$$

$$Y = \lambda y' = \mu \bar{y}'' + by \quad (2)$$

$$Z = \lambda c = \mu \bar{z}'' + bz \quad (3)$$

Con estas ecuaciones es posible despejar los parámetros de λ y μ , formando las siguientes igualdades:

$$\mu = \frac{x' bz - cbx}{cx'' - z'' x'}, \quad \lambda = \frac{\bar{x}'' bz - \bar{z}'' bx}{c\bar{x}'' - \bar{z}'' x'}$$

Estos parámetros son los factores de escala para cada punto del modelo. Sabiendo estos valores podremos obtener las coordenadas modelo a partir de las coordenadas imagen, utilizando las fórmulas 1, 2 y 3 enunciadas anteriormente.

- Para x, z se obtendrá un único valor.
- Para y se obtendrán dos valores: $y_1 = \lambda y'$ $y_2 = \mu y'' + by$

El valor final de y será la media aritmética de los dos valores, siempre y cuando la diferencia entre éstos no sea significativa. Esa diferencia que existe se denomina Paralaje Py .

➤ **Orientación Absoluta.**

Matemáticamente esto se consigue a través de una transformación ortogonal espacial en el que hay siete incógnitas: tres traslaciones, tres rotaciones y un factor de escala, partiendo de que se conocen mínimo 3 puntos de apoyo, es decir, sus coordenadas en el modelo y en el terreno, obteniéndose así la siguiente ecuación:

$$\begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{bmatrix} = \lambda [R] \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{bmatrix}$$

Donde:

- λ : factor de escala.
- $[R]$: $f(\Omega, \Phi, K)$ matriz de rotación del sistema modelo al sistema terreno.
- T_x, T_y, T_z : traslaciones del sistema modelo respecto del terreno.

El proceso de resolución de este tipo de ecuaciones se resuelve mediante una Transformación de Semejanza Tridimensional la cual emplea siete parámetros de transformación independientes:

- Tres rotaciones (Ω, Φ, K)
- Un factor de escala.
- Tres Traslaciones (T_x, T_y, T_z)

Por lo que para las rotaciones se tiene que:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = R^T \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}$$

Donde:

$$\begin{aligned} a_{11} &= \cos\Phi_1 \cos K_1 & a_{22} &= \cos\Omega_1 \cos K_1 - \sin\Omega_1 \sin\Phi_1 \sin K_1 \\ a_{12} &= -\cos\Phi_1 \sin K_1 & a_{23} &= -\sin\Omega_1 \cos\Phi_1 \\ a_{13} &= \sin\Phi_1 & a_{31} &= \sin\Omega_1 \sin K_1 - \cos\Omega_1 \sin\Phi_1 \cos K_1 \\ a_{21} &= \cos\Omega_1 \sin K_1 + \sin\Omega_1 \sin\Phi_1 \cos K_1 & a_{32} &= \sin\Omega_1 \cos K_1 + \cos\Omega_1 \sin\Phi_1 \sin K_1 \\ & & a_{33} &= \cos\Omega_1 \cos\Phi_1 \end{aligned}$$

Tomando en cuenta las Traslaciones y el Factor de Escala:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \lambda \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{bmatrix}$$

Los coeficientes de la matriz de rotación no son lineales, es decir vienen expresados en función de senos y cosenos, por lo que, para llegar a la expresión linealizada es necesario aplicar el desarrollo en serie de Taylor, para un punto cualquiera P .

$$X_P = (X_P)_o + \left(\frac{\delta X_P}{\delta \lambda}\right)_o d\lambda + \left(\frac{\delta X_P}{\delta \Omega}\right)_o d\Omega + \left(\frac{\delta X_P}{\delta \Phi}\right)_o d\Phi + \left(\frac{\delta X_P}{\delta K}\right)_o dK + \left(\frac{\delta X_P}{\delta T_x}\right)_o dT_x \\ + \left(\frac{\delta X_P}{\delta T_y}\right)_o dT_y + \left(\frac{\delta X_P}{\delta T_z}\right)_o dT_z$$

$$Y_P = (Y_P)_o + \left(\frac{\delta Y_P}{\delta \lambda}\right)_o d\lambda + \left(\frac{\delta Y_P}{\delta \Omega}\right)_o d\Omega + \left(\frac{\delta Y_P}{\delta \Phi}\right)_o d\Phi + \left(\frac{\delta Y_P}{\delta K}\right)_o dK + \left(\frac{\delta Y_P}{\delta T_x}\right)_o dT_x \\ + \left(\frac{\delta Y_P}{\delta T_y}\right)_o dT_y + \left(\frac{\delta Y_P}{\delta T_z}\right)_o dT_z$$

$$Z_P = (Z_P)_o + \left(\frac{\delta Z_P}{\delta \lambda}\right)_o d\lambda + \left(\frac{\delta Z_P}{\delta \Omega}\right)_o d\Omega + \left(\frac{\delta Z_P}{\delta \Phi}\right)_o d\Phi + \left(\frac{\delta Z_P}{\delta K}\right)_o dK + \left(\frac{\delta Z_P}{\delta T_x}\right)_o dT_x \\ + \left(\frac{\delta Z_P}{\delta T_y}\right)_o dT_y + \left(\frac{\delta Z_P}{\delta T_z}\right)_o dT_z$$

Siendo los valores de las derivadas parciales los siguientes:

$$\frac{\delta X}{\delta \lambda} = xa_{11} + ya_{12} + za_{13} = r_{11}$$

$$\frac{\delta X}{\delta \Omega} = 0 = r_{12}$$

$$\frac{\delta X}{\delta \phi} = \lambda [-x(\text{sen}\phi \text{cos}k) + y(\text{sen}\phi \text{sen}k) + z\text{cos}\phi] = r_{13}$$

$$\frac{\delta X}{\delta k} = \lambda [xa_{12} - ya_{11}] = r_{14}$$

$$\frac{\delta x}{\delta T_x} = 1 = r_{15}$$

$$\frac{\delta x}{\delta T_y} = 0 = r_{16}$$

$$\frac{\delta x}{\delta T_z} = 0 = r_{17}$$

$$\frac{\delta Y}{\delta \lambda} = xa_{21} + ya_{22} + za_{23} = r_{21}$$

$$\frac{\delta Y}{\delta \Omega} = -\lambda(xa_{31} + ya_{32} + za_{33}) = r_{22}$$

$$\frac{\delta Y}{\delta \phi} = \lambda[x(\text{sen}\Omega \cos\phi \cos k) + y(-\text{sen}\Omega \cos\phi \text{sen} k) + z(\text{sen}\Omega \text{sen}\phi)] = r_{23}$$

$$\frac{\delta Y}{\delta K} = \lambda[xa_{22} - ya_{21}] = r_{24}$$

$$\frac{\delta Y}{\delta T_x} = 0 = r_{25}$$

$$\frac{\delta Y}{\delta T_y} = 1 = r_{26}$$

$$\frac{\delta Y}{\delta T_z} = 0 = r_{27}$$

$$\frac{\delta Z}{\delta \lambda} = xa_{31} + ya_{32} + za_{33} = r_{31}$$

$$\frac{\delta Z}{\delta \Omega} = \lambda(xa_{21} + ya_{22} + za_{23}) = r_{32}$$

$$\frac{\delta Z}{\delta \phi} = \lambda[x(-\cos\Omega \cos\phi \cos k) + y(\cos\Omega \cos\phi \text{sen} k) + z(-\cos\Omega \text{sen}\phi)] = r_{33}$$

$$\frac{\delta Z}{\delta K} = \lambda[xa_{32} - ya_{31}] = r_{34}$$

$$\frac{\delta Z}{\delta T_x} = 0 = r_{35}$$

$$\frac{\delta Z}{\delta T_y} = 0 = r_{36}$$

$$\frac{\delta Z}{\delta T_z} = 1 = r_{37}$$

Determinación de los **Parámetros**: existen dos métodos para determinar los parámetros de orientación absoluta, se desarrollará sólo el procedimiento empleado para hallar la solución de este trabajo. Antes que nada es importante saber que para poder elaborar este proceso es necesario conocer al menos las coordenadas de tres puntos en el modelo y en la realidad o terreno.

Partiendo de las ecuaciones linealizadas anteriormente, se puede formar para cada punto las siguientes tres ecuaciones:

Pto1:

$$r_{11}^1 d\lambda + r_{12}^1 d\Omega + r_{13}^1 d\Phi + r_{14}^1 dK + r_{15}^1 dT_x + r_{16}^1 dT_y + r_{17}^1 dT_z = X_1 - (X_1)_o$$

$$r_{21}^1 d\lambda + r_{22}^1 d\Omega + r_{23}^1 d\Phi + r_{24}^1 dK + r_{25}^1 dT_x + r_{26}^1 dT_y + r_{27}^1 dT_z = Y - (Y_1)_o$$

$$r_{31}^1 d\lambda + r_{32}^1 d\Omega + r_{33}^1 d\Phi + r_{34}^1 dK + r_{35}^1 dT_x + r_{36}^1 dT_y + r_{37}^1 dT_z = Z_1 - (Z_1)_o$$

Los valores $(X_1)_o, (Y_1)_o, (Z_1)_o, \dots, (Z_n)_o$ se han obtenido de las ecuaciones generales, donde los parámetros introducidos para su cálculo son valores de la primera aproximación. Para los giros se pueden tomar como primera aproximación el valor de $\Omega_a=0; \Phi_a=0; K_a=0$ o calcular un valor para el giro acimutal (K) como la diferencia angular entre dos puntos en ambos sistemas:

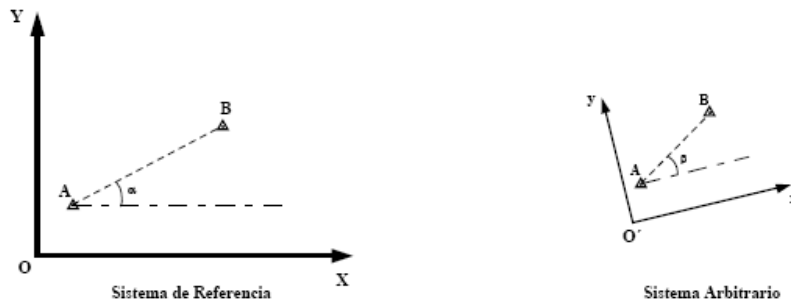


Figura 39: Cálculo Aproximado del Giro Acimutal.
(Pérez Álvarez, 2001)

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= \arctg \left(\frac{Y_B - Y_A}{X_B - X_A} \right) & \beta &= \arctg \left(\frac{y_B - y_A}{x_B - x_A} \right) \end{aligned} \right\} K_a = (\alpha - \beta)$$

El Factor de Escala puede obtenerse de la media aritmética de todos los factores de escala posibles, expresándose como:

$$\lambda = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n (d_i^j D_i^j)}{\sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n (d_i^j)^2}$$

Donde:

$$D = \sqrt{(\Delta X)^2 + (\Delta Y)^2 + (\Delta Z)^2} \quad d = \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2 + (\Delta z)^2}$$

Como en el trabajo que se describe se calculó un valor aproximado para el giro acimutal, las fórmulas de los valores de cada una de las traslaciones aproximadas quedan de la siguiente manera:

$$T_{Xa} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i - \lambda_a \sum_{i=1}^n (x_i \cos K_a - y_i \sin K_a)}{n}$$

$$T_{Ya} = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i - \lambda_a \sum_{i=1}^n (x_i \sin K_a + y_i \cos K_a)}{n}$$

$$T_{Za} = \frac{\sum_{i=1}^n Z_i - \lambda_a \sum_{i=1}^n z_i}{n}$$

Los valores $(F_x)_o$, $(F_y)_o$, $(F_z)_o$ pueden obtenerse de la expresión general, considerando los valores aproximados iniciales de los parámetros:

$$(F_x)_o = \lambda_a (x \cos K_a - y \sin K_a) + T_{Xa} - X$$

$$(F_y)_o = \lambda_a (x \sin K_a + y \cos K_a) + T_{Ya} - Y$$

$$(F_z)_o = \lambda_a z + T_{Za} - Z$$

El sistema de ecuaciones matricial de observaciones resultante sería:

$$\begin{bmatrix} r_{11}^1 & r_{12}^1 & r_{13}^1 & r_{14}^1 & r_{15}^1 & r_{16}^1 & r_{17}^1 \\ r_{21}^1 & r_{22}^1 & r_{23}^1 & r_{24}^1 & r_{25}^1 & r_{26}^1 & r_{27}^1 \\ r_{31}^1 & r_{32}^1 & r_{33}^1 & r_{34}^1 & r_{35}^1 & r_{36}^1 & r_{37}^1 \\ r_{11}^2 & r_{12}^2 & r_{13}^2 & r_{14}^2 & r_{15}^2 & r_{16}^2 & r_{17}^2 \\ r_{21}^2 & r_{22}^2 & r_{23}^2 & r_{24}^2 & r_{25}^2 & r_{26}^2 & r_{27}^2 \\ r_{31}^2 & r_{32}^2 & r_{33}^2 & r_{34}^2 & r_{35}^2 & r_{36}^2 & r_{37}^2 \\ r_{11}^n & r_{12}^n & r_{13}^n & r_{14}^n & r_{15}^n & r_{16}^n & r_{17}^n \\ r_{21}^n & r_{22}^n & r_{23}^n & r_{24}^n & r_{25}^n & r_{26}^n & r_{27}^n \\ r_{31}^n & r_{32}^n & r_{33}^n & r_{34}^n & r_{35}^n & r_{36}^n & r_{37}^n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d\lambda \\ d\Omega \\ d\Phi \\ dK \\ dT_x \\ dT_y \\ dT_z \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} X_1 - (X_1)_0 \\ Y_1 - (Y_1)_0 \\ Z_1 - (Z_1)_0 \\ X_2 - (X_2)_0 \\ Y_2 - (Y_2)_0 \\ Z_2 - (Z_2)_0 \\ X_n - (X_n)_0 \\ Y_n - (Y_n)_0 \\ Z_n - (Z_n)_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{X1} \\ V_{Y1} \\ V_{Z1} \\ V_{X2} \\ V_{Y2} \\ V_{Z2} \\ V_{Xn} \\ V_{Yn} \\ V_{Zn} \end{bmatrix}$$

Aplicando la condición de mínimos al sistema de ecuaciones:

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

Resolviendo ese sistema de ecuaciones se hallan las siete incógnitas ($d\lambda$, $d\Omega$, $d\Phi$, dK , dT_x , dT_y , dT_z), que se corregirán a los valores aproximados hallados con anterioridad, obteniendo así los valores de la primera iteración:

$$\begin{aligned} \lambda &= \lambda_a + d\lambda & \Omega &= \Omega_a + d\Omega \\ \Phi &= \Phi_a + d\Phi & K &= K_a + dK \\ T_x &= T_{xa} + dT_x & T_y &= T_{ya} + dT_y \\ T_z &= T_{za} + dT_z \end{aligned}$$

La precisión de los valores hallados se calcula como:

$$\begin{aligned} V_X &= X_i^c - X_i \\ V_Y &= Y_i^c - Y_i \\ V_Z &= Z_i^c - Z_i \end{aligned}$$

Y el error medio cuadrático viene expresado por:

$$Em = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (V_{Xi}^2 + V_{Yi}^2 + V_{Zi}^2)}{7}}$$

3.3.3. Desarrollo de Procedimientos en Excel®.

Para elaborar el desarrollo de las fórmulas se utilizó un ejemplo del mismo autor de la guía “Apuntes de Fotogrametría II”, en donde se presentan unos valores de coordenadas imagen, los cuales fueron empleados para realizar el proceso de orientación, tanto relativa como absoluta en la herramienta Microsoft Excel®, así como la obtención de coordenadas modelo.

La herramienta desarrollada se basa en este proceso elaborado en Excel, ya que los datos con los que es puesta a prueba son los mismos, y la comparación de los resultados obtenidos, se hace con este archivo, así como las fórmulas utilizadas.

Los resultados de este procedimiento se encuentran en el siguiente capítulo y los datos de partida suministrados son los mostrados a continuación:

- Para la Orientación Relativa:

Coordenadas leídas sobre los fotogramas						
	x'	y'	z'	x''	y''	z''
1	12.400	-1.113	-100.800	-2.556	-1.128	-100.800
2	22.618	-12.826	-100.800	7.748	-12.903	-100.800
3	-3.255	-18.263	-100.800	-19.009	-18.383	-100.800
4	-3.124	-1.307	-100.800	-18.128	-1.335	-100.800
5	-3.075	16.750	-100.800	-18.170	16.826	-100.800
6	21.507	37.775	-100.800	7.570	38.003	-100.800
7	12.654	52.584	-100.800	0.719	52.904	-100.800
8	-13.299	-13.175	-100.800	-28.278	-13.234	-100.800

Tabla 3: Coordenadas Ejemplo para el Desarrollo de la O. Relativa en Excel.

(Elaboración Propia)

- Para la Orientación Absoluta:

	Coordenadas Terreno			Coordenadas Modelo		
	X (m)	Y(m)	Z(m)	x(m)	y(m)	z(m)
1	728774.549	311483.607	354.187	1.305	459.872	215.749
2	729172.082	311471.831	352.825	403.101	460.644	219.685
3	728747.803	310593.210	372.1036	2.560	-440.437	218.744
4	729141.191	310561.243	362.602	400.995	-460.037	214.087

Tabla 4. Coordenadas Ejemplo para el Desarrollo de la O. Absoluta en Excel.

(Elaboración Propia)

En Excel se desarrollaron en tres partes las orientaciones como se ilustra a continuación (Figura 40, 41 y 42):

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V					
14	B					DELTA			Valores iniciales						A21	A22	A23	A24	A25	A26						
15										ω_1	0	f	100.8		0	2.556	-100.8	-2.56	0	1.1						
16	B11	B12	B16	B17	B18					ϕ_1	0	H			0	-7.748	-100.8	7.75	0	13						
17	1507.565	-16.832	10161.895	-2.845	-257.645		1.5120			κ_1	0	bx	0.8		0	19.009	-100.8	-19	0	18						
18	1498.896	-192.464	10326.134	99.376	780.998		7.7616			ω_2	0	by	0		0	18.128	-100.8	-18.1	0	1.3						
19	1588.003	-287.325	10496.369	-347.161	-1916.107		12.0960			ϕ_2	0	bz	0		0	18.17	-100.8	-18.2	0	-17						
20	1512.403	-19.523	10162.385	-23.693	-1827.302		2.8224			κ_2	0				0	-7.57	-100.8	7.57	0	-38						
21	1521.576	252.608	10442.476	304.348	-1831.536		-7.6608								0	-0.719	-100.8	0.72	0	-53						
22	1404.850	531.374	11596.203	-285.957	763.056		-22.9824								0	28.278	-100.8	-28.3	0	13						
23	1203.048	631.639	12942.544	-37.808	72.475		-32.2560																			
24	1509.883	-196.564	10334.998	-372.563	-2850.422		5.9472																			
26	B'					B' · B						B' · X														
28	1.508E+03	1.499E+03	1.588E+03	1.512E+03	1.522E+03	1.405E+03	1.203E+03	1.510E+03		1.734E+07	7.943E+05	1.262E+08	-9.891E+05	-1.096E-07							-36378.88112					
29	-1.683E+01	-1.925E+02	-2.873E+02	-1.952E+01	2.526E+02	5.314E+02	6.316E+02	-1.966E-02		7.943E+05	9.040E+05	9.571E+06	5.541E+04	9.891E+05							-40740.44275					
30	1.016E+04	1.033E+04	1.050E+04	1.016E+04	1.044E+04	1.160E+04	1.294E+04	1.033E+04		1.262E+08	9.571E+06	9.412E+08	-7.365E+06	-7.203E-07							-451368.1992					
31	-2.845E+00	9.938E+01	-3.472E-02	-2.369E+01	3.043E+02	-2.860E+02	-3.781E+01	-3.726E-02		-9.891E+05	5.541E+04	-7.365E+06	4.456E+05	1.070E+06							-254.8676675					
32	-2.576E+02	7.810E+02	-1.916E+03	-1.827E+03	-1.832E+03	7.631E+02	7.248E+01	-2.850E-03		-1.096E-07	9.891E+05	-7.203E-07	1.070E+06	1.975E-07							-45457.99212					
34	(B' · B)'					X=(B' · B)' · (B' · D)			Ri						Rd						Nuevos Valores iniciales					
36	9.630E-06	5.596E-06	-1.344E-06	-2.204E-06	2.794E-07		0.016152	dbv		1.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	1.000E+00	-7.216E-05	2.144E-03						ϕ_1	0	H			
37	5.596E-06	4.959E-06	-8.157E-07	-1.599E-06	-3.271E-08		-0.035524	dbz		0.000E+00	1.000E+00	0.000E+00	6.732E-05	1.000E+00	2.262E-03						κ_1	0	bx ₁ 0.8			
38	-1.344E-06	-8.157E-07	1.898E-07	3.279E-07	-3.014E-08		-0.002262	du2		0.000E+00	0.000E+00	1.000E+00	-2.144E-03	-2.261E-03	1.000E+00						ω_2	-0.002262	by ₁ 0.01615			
39	-2.204E-06	-1.599E-06	3.279E-07	3.267E-06	-1.237E-07		0.002144	dφ2														ϕ_2	0.002144	bz ₁ -0.0355		
40	2.794E-07	-3.271E-08	-3.014E-08	-1.237E-07	1.040E-07		7.216E-05	dk2														κ_2	0.000072			
42	Coordenadas nuevas a ser leídas sobre los fotogramas																									
43		x'	y'	z'	x''	y''	z''																			
44		12.400	-1.113	-100.800	-2.772	-1.356	-100.791																			
45		22.618	-12.826	-100.800	7.533	-13.130	-100.787																			
46		-3.255	-18.263	-100.800	-19.224	-18.612	-100.717																			
47		-3.124	-1.307	-100.800	-18.344	-1.564	-100.758																			
48		-3.075	16.750	-100.800	-18.387	16.597	-100.799																			
49		21.507	37.775	-100.800	7.351	37.775	-100.902																			
50		12.654	52.584	-100.800	0.499	52.676	-100.921																			
51		-13.299	-13.175	-100.800	-28.493	-13.464	-100.709																			

Figura 40. Desarrollo de la Orientación Relativa en Excel.

(Elaboración Propia)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
2	Valores Iniciales					Coordenadas a ser leídas sobre los fotogramas									
3	$\omega 1_1$	0	f	100.8		x'	y'	z'	x''	y''	z''				
4	$\phi 1_1$	0	H			12.400	-1.113	-100.800	-2.772	-1.355	-100.791				
5	$k 1_1$	0	bx_1	0.8		22.618	-12.826	-100.800	7.531	-13.131	-100.787				
6	$\omega 2_1$	0.00226351	By_1	0.01582493		-3.255	-18.263	-100.800	-19.226	-18.609	-100.717				
7	$\phi 2_1$	-0.00214003	Bz_1	-0.03506167		-3.124	-1.307	-100.800	-18.344	-1.561	-100.758				
8	$k 2_1$	-7.2681E-05				-3.075	16.750	-100.800	-18.384	16.600	-100.799				
9			by_1	0.01265995		21.507	37.775	-100.800	7.357	37.775	-100.901				
10			bz_1	-0.02804934		12.654	52.584	-100.800	0.508	52.676	-100.920				
11						-13.299	-13.175	-100.800	-28.495	-13.459	-100.709				
15						Valores de u, v, λ			Coordenadas Modelo						
16						PTO	μ	λ	x	y	z				
17						1	0.05250	0.05278	0.654	-0.069	-5.320				
18						2	0.05262	0.05303	1.199	-0.679	-5.331				
19						3	0.05014	0.05004	-0.163	-0.917	-5.078				
20						4	0.05262	0.05254	-0.164	-0.069	-5.329				
21						5	0.05231	0.05225	-0.161	0.878	-5.301				
22						6	0.05603	0.05651	1.215	2.132	-5.682				
23						7	0.06549	0.06586	0.833	3.463	-6.638				
24						8	0.05285	0.05256	-0.699	-0.696	-5.350				

Figura 41. Desarrollo del Cálculo de Coordenadas Modelo en Excel. (Elaboración Propia)

	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC	AD	AE	AF	AG	AH	AI	AJ	AK	AL	AM		
4	PRIMERA ITERACION																								
5	Coordenadas Terreno											Coordenadas Modelo													
6	Pro	X(m)	Y(m)	Z(m)	x(m)	y(m)	z(m)	(F.)	(F.)	(F.)	A											L			
7	1	72874.56	31943.61	354.87	1.55	453.872	235.748	-0.0739	-0.05897	-4.93870	15.801	0.000	215.516	-454.946	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.02793		
8	2	72972.08	31947.83	392.825	403.101	460.644	218.685	0.02081	-0.06364	-10.19695	459.602	-213.516	0.000	15.638	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.05687	
9	3	72874.78	31953.210	372.1036	2.560	-440.437	218.744	0.06164	0.15399	10.01381	216.749	454.946	-15.638	0.000	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-4.93870	
10	4	72941.15	31955.24	382.802	400.995	460.037	214.087	-0.05445	-0.05649	5.12022	417.422	0.000	217.411	-443.075	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02081	
11	Sum.	295235.6	924409.3	1441.776	807.961	20.042	888.235				218.685	443.075	-413.102	0.000	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-10.19695	
12	Dist. Terreno Modelo											Valores Aproximados													
13	d_1	397.720	401.616					λ_1	0.990															0.06164	
14	d_2	890.978	900.375					μ_1	0.000	0.9995	0.0095	0.0000												0.15399	
15	d_3	982.598	1002.989					ν_1	-1.102445	η_1	0.000	-0.0195	0.9995	0.0000										0.15399	
16	d_4	978.888	986.084					ξ_1	-1.80396	κ_1	0.000	0.0000	0.0000	1.0000										-0.05445	
17	d_5	911.84	920.700					τ_{1x}	728759.949	τ_{1y}	310238.818													0.02081	
18	d_6	394.759	398.944					τ_{1z}	165.610															0.02081	
19	Sum.	4593.140	4610.959																						
22	A^1											$A^1 A$											$A^1 L$		
23	15.801	459.602	215.749	417.422	447.708	218.685	-11.325	-440.298	216.744	396.294	-472.449	214.067	1043880.92	0.00	0.00	0.00	898.19	-5.44	888.27					-133.542	
24	0.000	-213.516	454.946	0.000	-217.411	443.075	0.000	-216.480	-435.742	0.000	-218.171	-467.560	0.00	896292.92	-16286.21	-171723.14	0.00	-899.28	-5.38					-12821.937	
25	215.516	0.000	-15.638	217.411	0.000	-413.102	216.480	0.000	11.208	211.871	0.000	-382.298	0.00	-16286.21	501783.43	-54.40	899.28	0.00	-799.83					2444.19	
26	-454.946	15.638	0.000	-443.075	413.102	0.000	435.742	-11.208	0.000	467.560	382.298	0.000	0.00	0.00	-171723.14	-54.40	1128956.29	5.38	799.83	0.00				-28.740	
27	1.000	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00				0.000	
28	0.000	1.000	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00				0.000	
29	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00				0.000	
30	$(A^1 A)^1$											$(A^1 A)^1 (A^1 L)$											Cálculo de los parámetros		
33	1E-06	-7.76E-24	-3.3E-22	1.45922E-24	-0.000204	1.37E-06	-0.00022	-0.0001	d_{1x}	λ_1	0.9895														
34	-7E-24	1.239E-06	1.383E-07	4.85293E-11	-2.93E-05	0.000265	2.89E-05	-0.0094	d_{1y}	μ_1	-0.0164														
35	-2E-22	1.363E-07	6.374E-06	7.94968E-09	-0.001989	2.77E-05	0.001275	0.0373	d_{1z}	ν_1	0.0197														
36	1.2E-24	4.853E-11	7.949E-09	1.03209E-06	-3.1E-06	-0.000208	1.69E-06	-1E-05	d_{1x}	ξ_1	-0.0195														
37	-0.0002	-2.93E-05	-0.001989	-3.09612E-06	0.585411	-0.00958	-0.2298	-2.9232	d_{1y}	κ_1	0.0000														
38	1.4E-06	0.0002653	2.77E-05	-0.000208363	-0.009595	0.348291	0.009597	-3.5136	d_{1z}	τ_{1x}	728756.0262														
39	-0.0002	2.892E-05	0.0012747	1.58954E-06	-0.229499	0.009597	0.552549	2.75387	d_{1x}	τ_{1y}	310235.3045														
40										τ_{1z}	148.3633														

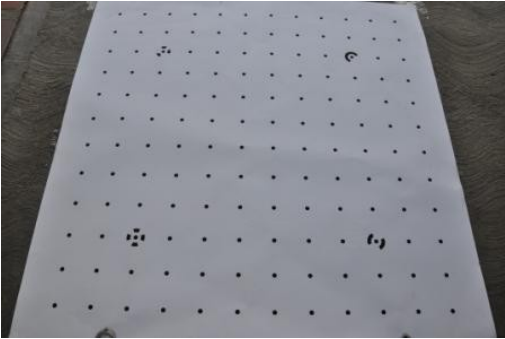
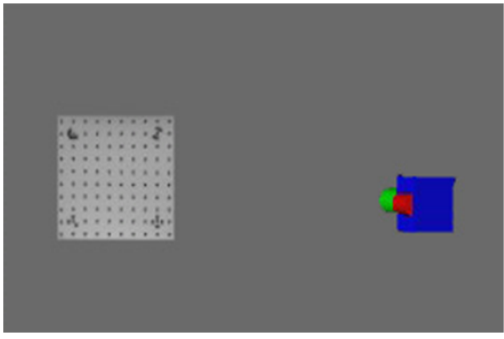
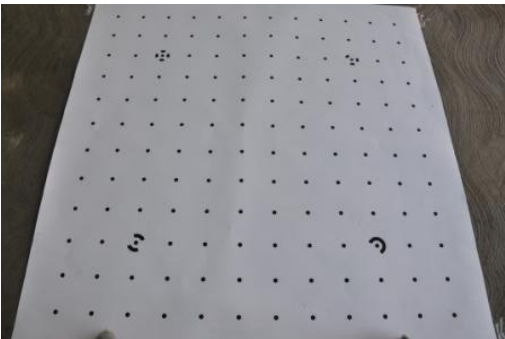
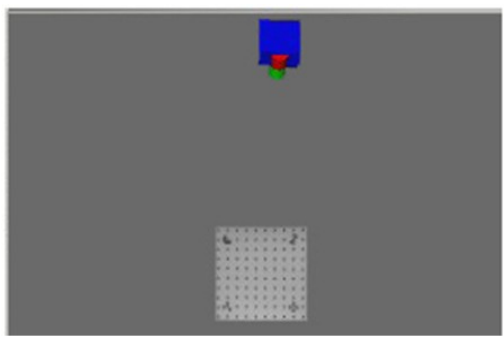
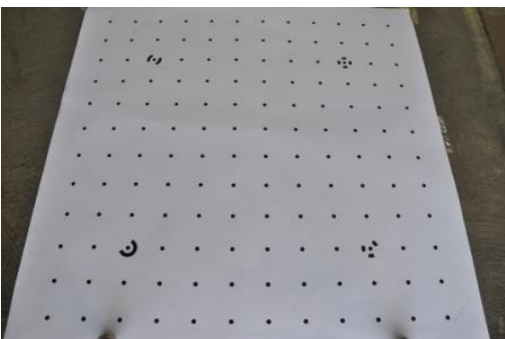
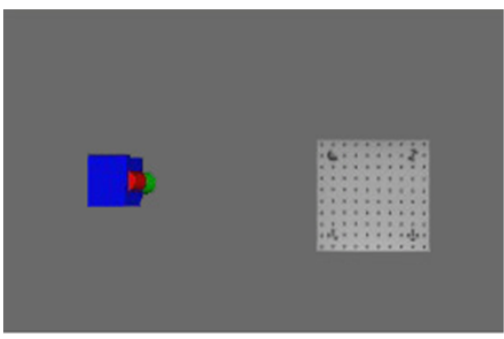
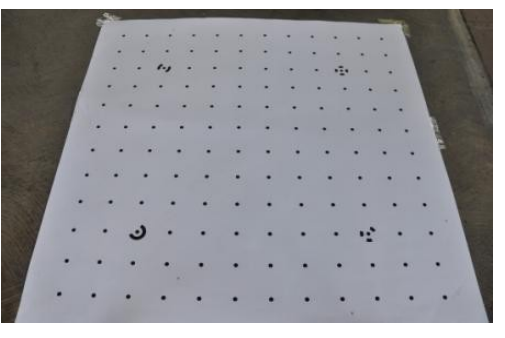
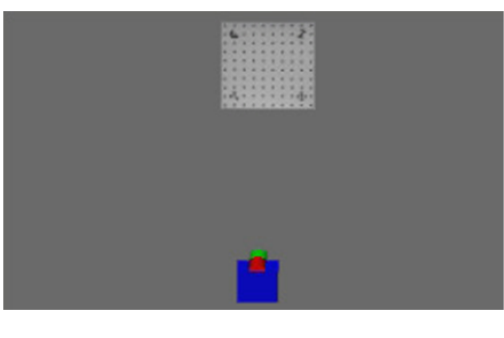
Figura 42. Desarrollo de la Orientación Absoluta en Excel. (Elaboración Propia)

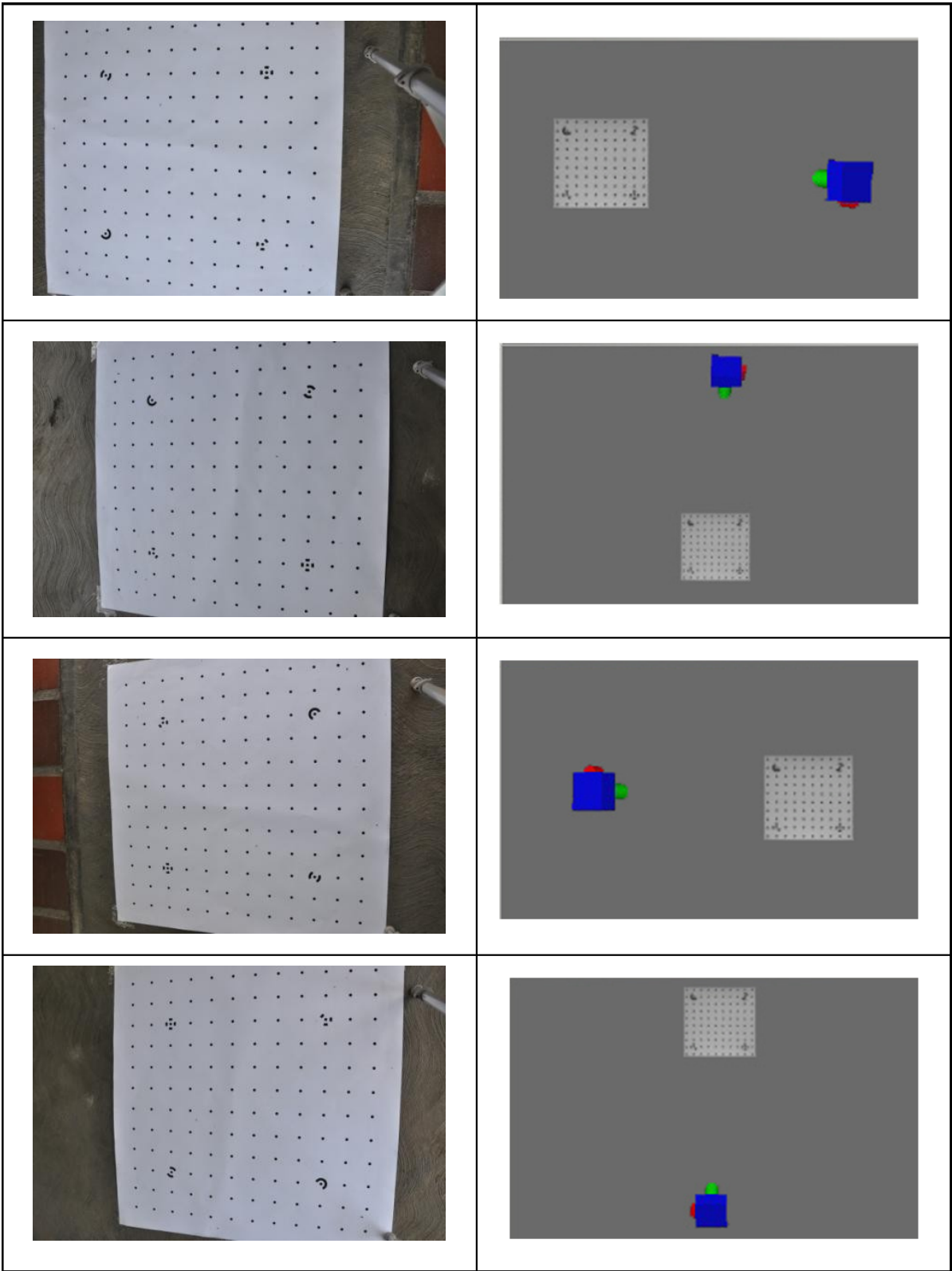
En base a los procedimientos ilustrados anteriormente se elaboró el código de la aplicación, pese a que sólo se empleó el de la orientación relativa por razones que son descritas posteriormente, el haber desarrollado tanto el cálculo de coordenadas modelo como la orientación absoluta permitió comprender la lógica de estos procesos, así como los aspectos en los cuales se encuentran fundamentados, y las variables que corresponden a cada uno.

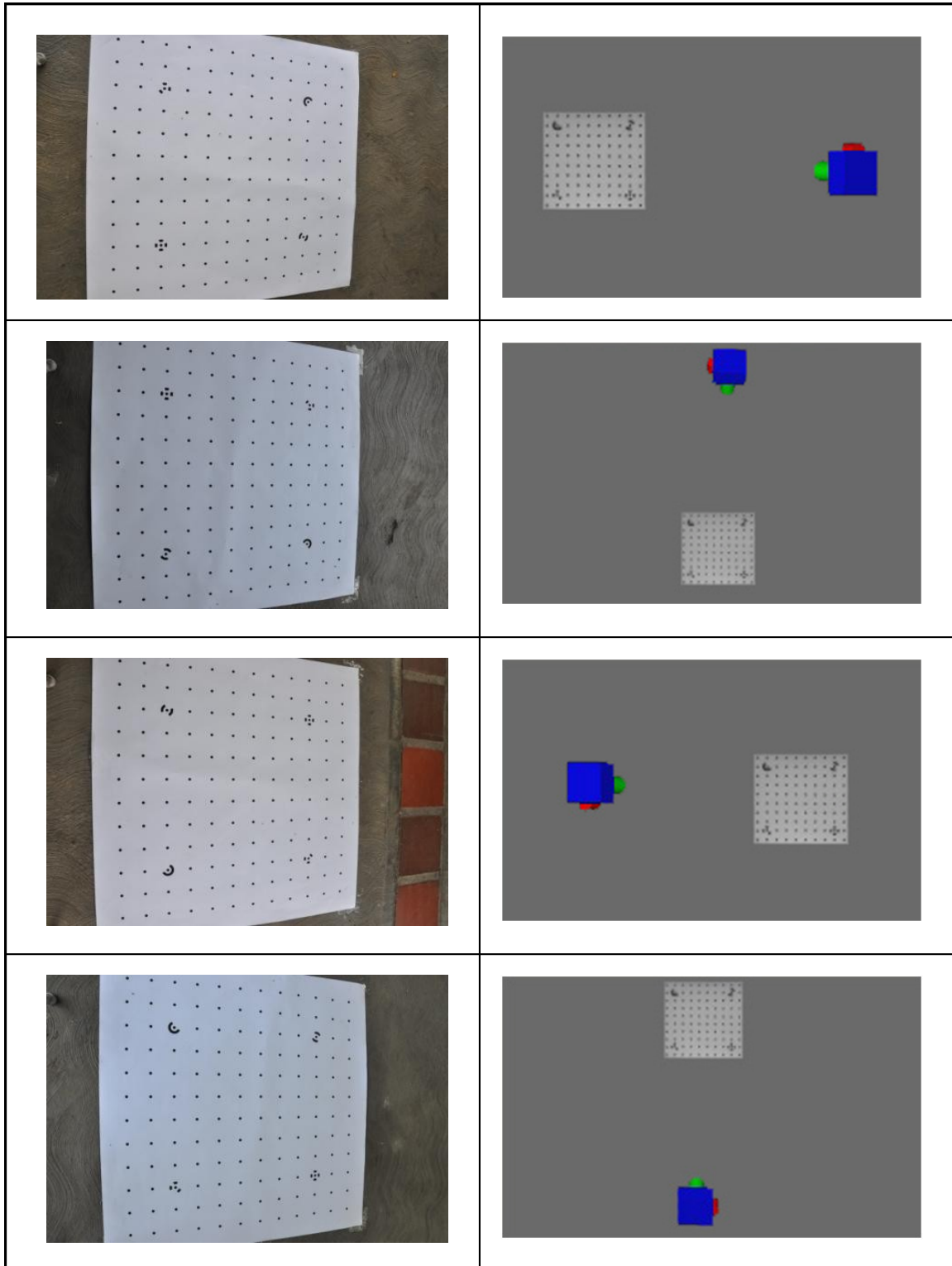
3.3.4. Calibración de la Cámara.

La calibración se llevó a cabo para conocer cuáles son las precisiones que poseen las imágenes tomadas en lo que respecta a las condiciones de la cámara, esto se realiza porque a pesar de que no es un objetivo de este proyecto realizar la orientación interior, es importante conocer cuál es la calidad de las imágenes adquiridas, para así tener conocimiento de las posibles imprecisiones que se puedan obtener debido a este aspecto.

Para la calibración de la cámara digital no métrica Nikon D90, se capturaron un total de 12 fotografías desde distintos ángulos a la hoja de calibración. Dichas fotografías se tomaron tratando de cubrir la mayor área posible de la imagen y en el orden representado en la siguiente *tabla*:

Imágenes	Dirección de Toma
	
	
	
	





*Tabla 5. Imágenes para la Calibración de la cámara.
(Elaboración Propia)*

Una vez adquiridas las imágenes, se realizaron los pasos que se muestran a continuación en el software de Photomodeler®:

- Se creó un nuevo proyecto en Photomodeler seleccionando: *File – New Project – Camera Calibration Project*.

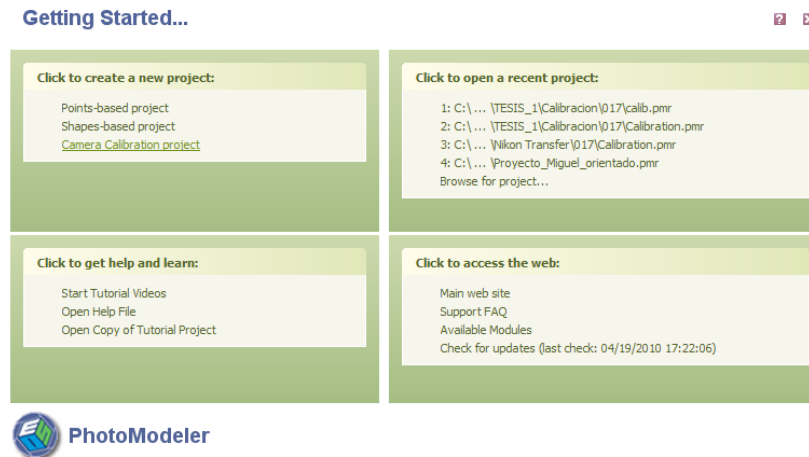


Figura 43. Cuadro para seleccionar el proyecto a realizar. (Photomodeler®)

- Luego de seleccionar el proyecto, el programa solicita al usuario que elija las imágenes tomadas previamente, en este proyecto fueron 12 imágenes.

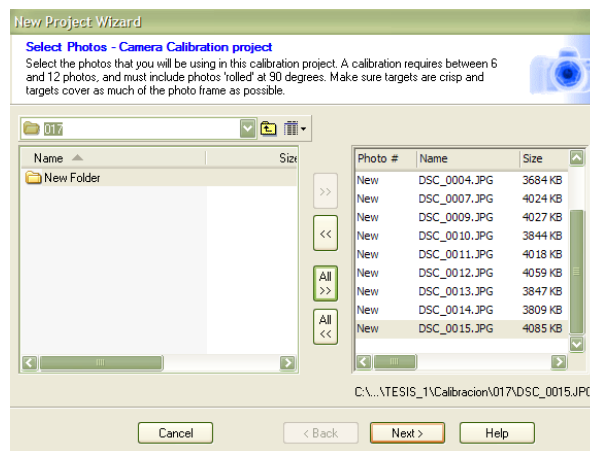


Figura 44. Cuadro de selección de imágenes. (Photomodeler®)

- Una vez cargas las imágenes al proyecto, se presentó otro cuadro de diálogo para comenzar con el proceso de calibración automática de la cámara, como se muestra a continuación:

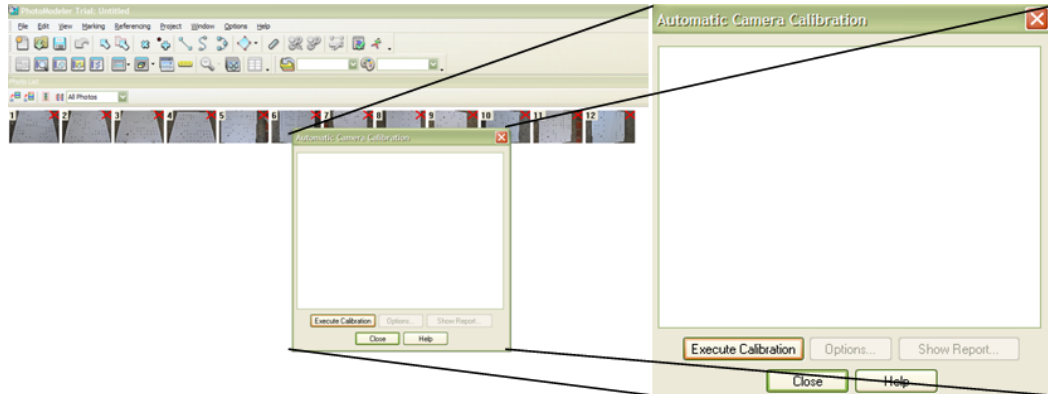


Figura 45. Cuadro de Calibración Automática de la cámara.
(Photomodeler®)

- Se ejecutó la calibración, aquí se marca en cada foto la cantidad de puntos identificables del patrón, así como los puntos de control de cada uno:

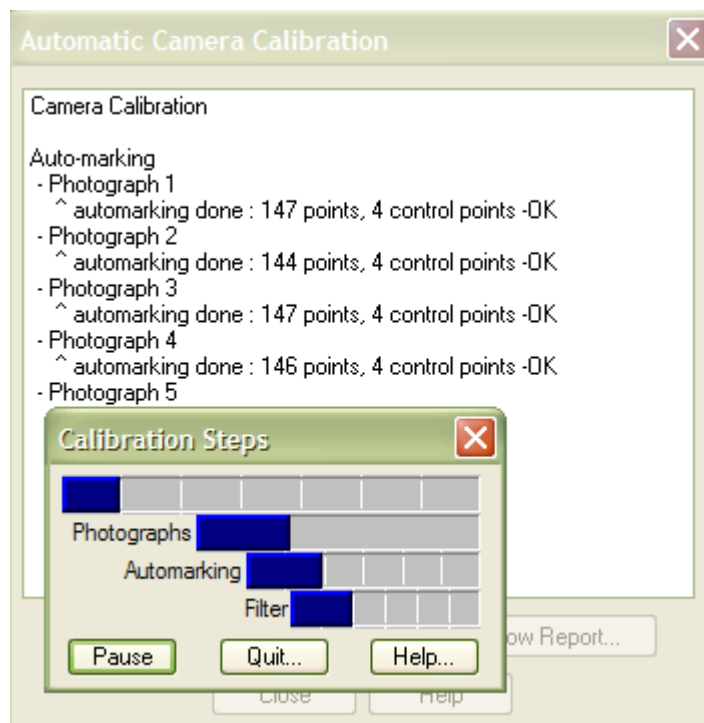


Figura 46. Proceso de Calibración.
(Photomodeler®)

- Culminado el proceso de calibración, éste genera un reporte que contiene información acerca de la cantidad de fotos utilizadas, los puntos identificados en cada foto, el acercamiento de la lente, la ubicación del punto principal de la cámara, las distorsiones de la lente, el tamaño del píxel, entre otros. El reporte obtenido se presenta en el siguiente capítulo.

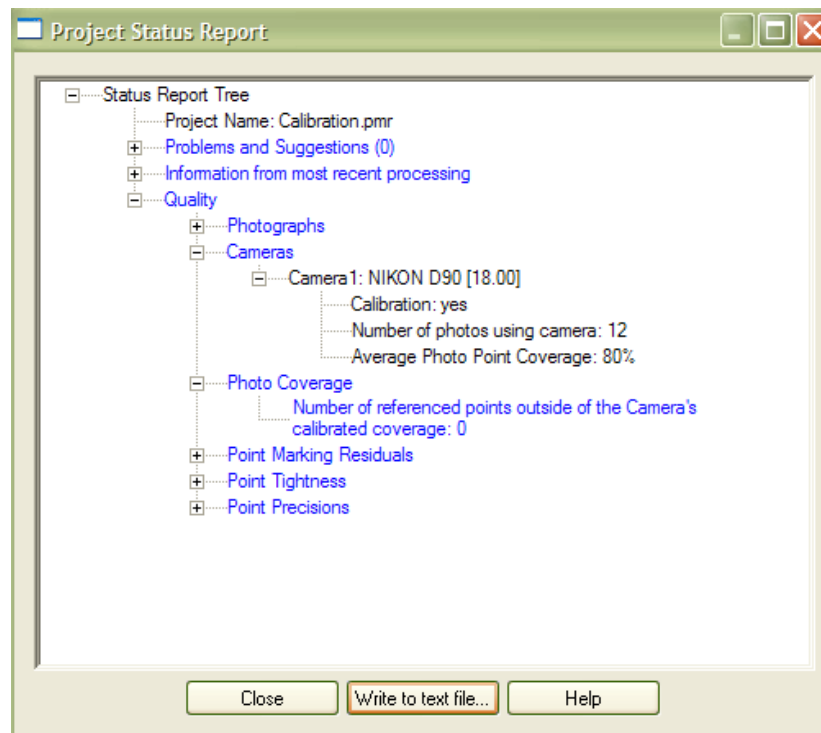


Figura 47. Reporte Final obtenido luego de la calibración automática. (Photomodeler®)

3.4. Diseño Conceptual de la Aplicación

3.4.1. Análisis del Problema.

Antes de comenzar con cualquier herramienta de programación es de suma importancia definir cuáles son las variables de entrada, las variables de salida y el método a utilizar, y en base a esto cómo se desarrollará el programa.

Para elaborar el programa se fundamentó en el archivo Excel® elaborado previamente, allí fue posible identificar las variables:

- Variables de Entrada: Coordenadas Imagen en mm.
- Variables de Salida: Valores de Orientación Relativa (β , β_z , ω , ϕ y κ de la imagen derecha), nuevas coordenadas imagen luego de la orientación relativa y coordenadas terrestres.

Ahora bien, en base al procedimiento utilizado para el desarrollo en Excel, se conceptualizó el método empleado, el cual se corresponde con un Ajuste por Mínimos Cuadrados, donde fue necesario trabajar con operaciones matriciales e iteraciones hasta obtener los valores deseados. A medida que se conocían todas las operaciones necesarias, se investigaba la forma de transcribirlas a código de programación en Visual Basic®.

Una vez definido el método que se debía aplicar para las orientaciones, se estableció que no sería necesario programar en Visual Basic® la orientación absoluta, ya que la plataforma Microstation® posee grandes ventajas para trabajar con proyecciones cónicas, esto aunado a que es posible definir al inicio del programa las coordenadas terrestres de los puntos de control que se encuentran en la imagen, lo que permite trabajar directamente con coordenadas reales una vez que se haya aplicado al modelo los parámetros de orientación relativa.

El aspecto mencionado anteriormente es de suma importancia, ya que modifica por completo la metodología tradicional de trabajo, porque en ningún momento se emplean las coordenadas del modelo, se comienza identificando los puntos de coordenadas imagen para la orientación relativa y una vez resuelto esto, se obtienen coordenadas reales sobre la imagen, debido a los datos introducidos al inicio del programa. Esto se puede lograr debido a que Microstation® permite trabajar con diversos planos de altura definidos por el usuario.

3.4.2. Diseño de Algoritmos de la Aplicación.

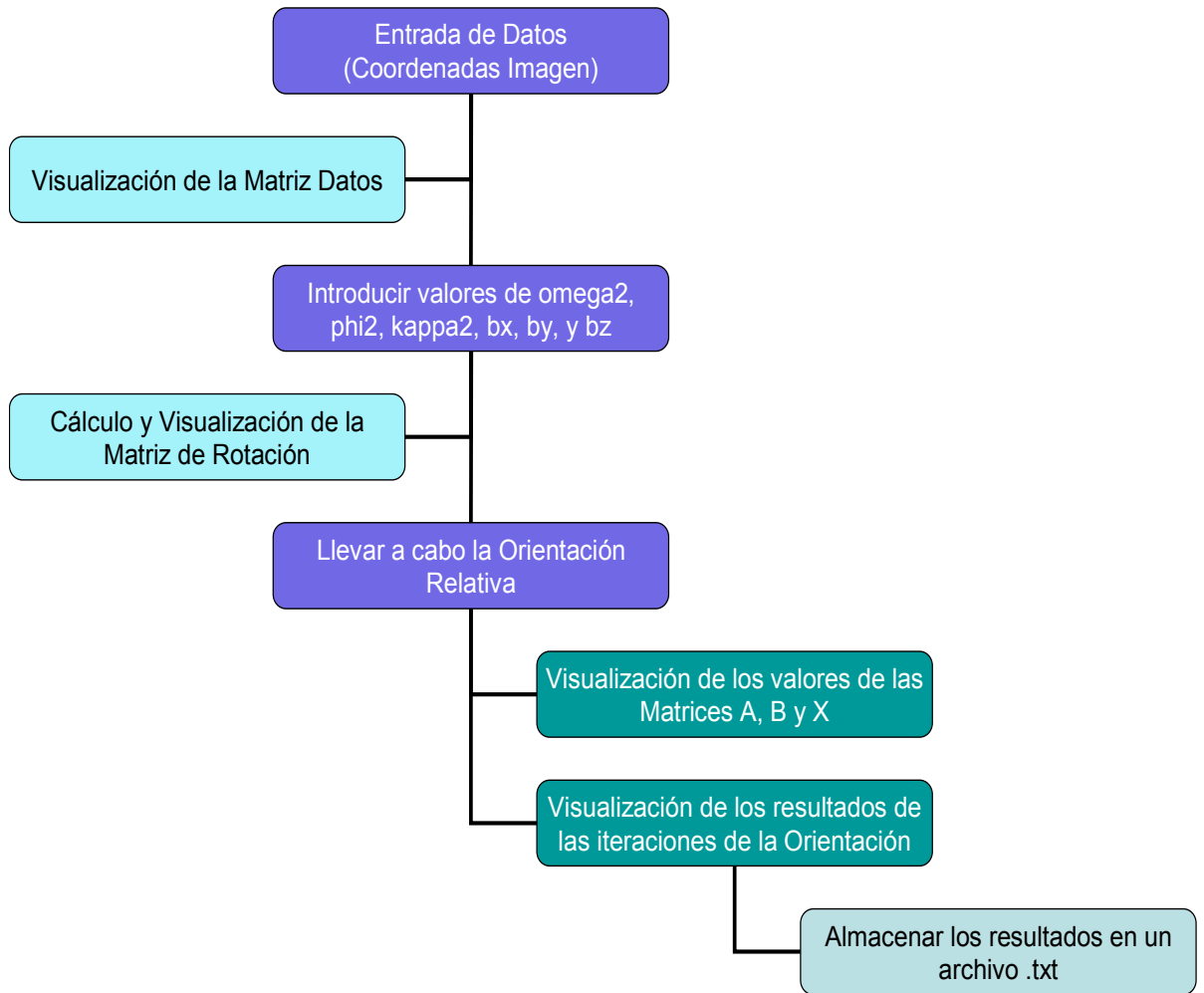
En esta etapa se llevo a cabo el diseño lógico de la elaboración del programa en base a la aplicación que debe tener el mismo. Para esto fueron tomados en cuenta diversos aspectos como:

- Comprender los diferentes métodos de captura de datos.
- Cómo introducir datos de la manera más idónea.
- El orden en que se presenten los cuadros de diálogo al usuario.
- La presentación de los resultados.
- En qué orden debe trabajar el programa.

Frente a todos estos factores, se comenzó con el diseño de resolución, el cual fue cambiando a medida que se analizaban estos elementos dentro del algoritmo obtenido.

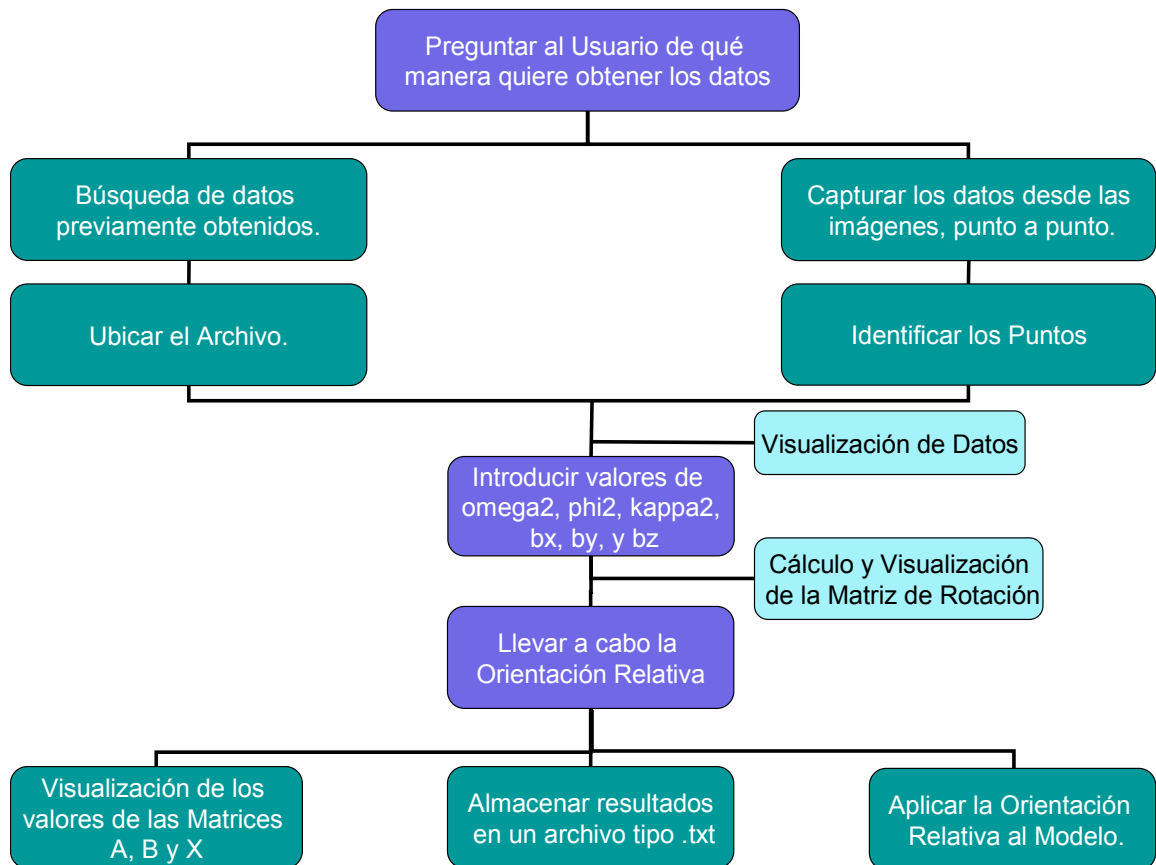
En primer lugar se realizó un algoritmo en donde todas las variables y el método de solución se encontraban en un mismo “*User Form*” (Cuadro de Diálogo), luego que ya había más familiarización con la herramienta, se decidió que era más organizado y práctico trabajar por “*Modules*” (Módulos) e ir creando los procedimientos dentro de varios módulos, para luego ser llamados en los *User Forms*.

Reestructurado el programa de esta forma, también fue necesario cambiar la logística de los *User Forms*, ya que antes todo estaba contenido en uno solo, por lo que se crearon varios con distintas funciones, aquí entra en juego el factor de comprender cómo debe ser la estructura del programa.



Esquema 2. Algoritmo Inicial para el desarrollo de la Aplicación (Elaboración Propia).

Ante esta situación, se resolvían varias interrogantes, en primera instancia ya se tenía una estructura del programa, y si los *User Forms* se diseñaban de la misma forma, entonces se conocía el orden en que aparecerían los cuadros de diálogo al usuario; ahora bien observando esto se percibió que faltaba especificar las distintas opciones de captura de datos, así como la incoherencia al final del algoritmo donde se muestran los resultados y luego se almacenan, porque resulta más cómodo para el usuario visualizar los valores en un archivo tipo txt. Así que el nuevo algoritmo resulta de la siguiente forma:

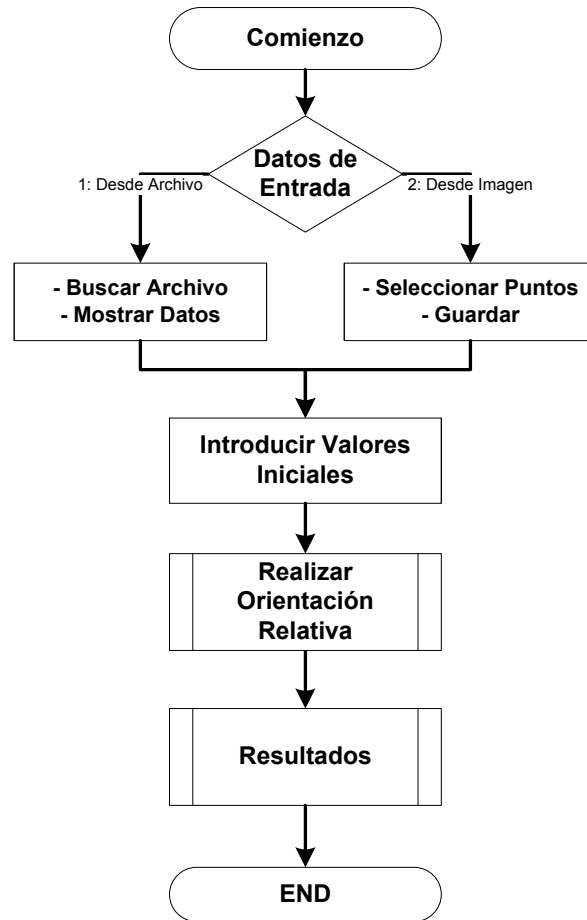


Esquema 3. Algoritmo Final para el desarrollo de la Aplicación (Elaboración Propia).

3.5. Diseño Lógico de la Aplicación

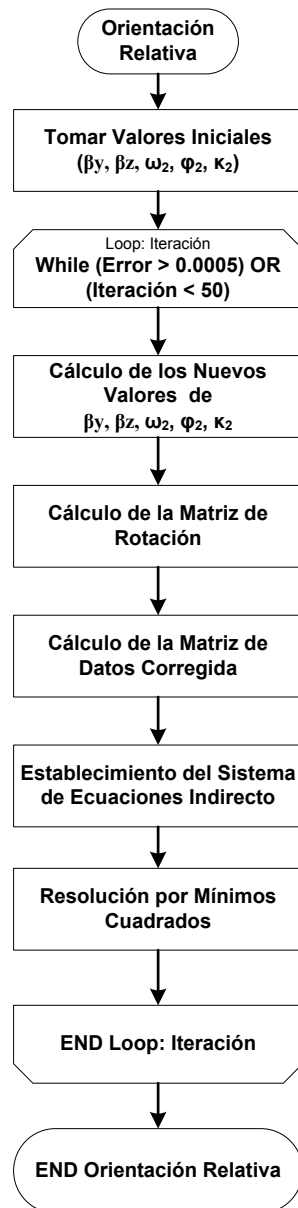
3.5.1. Elaboración del Diagrama de Flujo.

Una vez esquematizada la forma de crear la herramienta, se construyó el diagrama de flujo, que permitiera visualizar las funciones y estructuras del mismo. Este diagrama se subdivide en otros, cada uno de ellos es presentado a continuación:



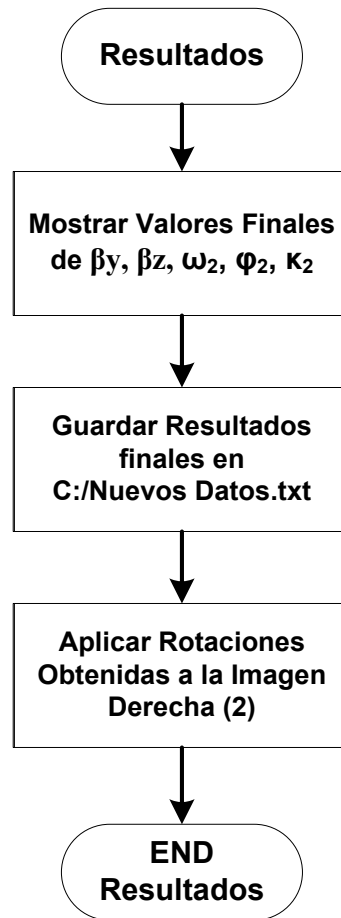
*Diagrama 1. Esquema principal del Programa
(Elaboración Propia)*

Este diagrama corresponde al esqueleto principal del programa creado, donde en un principio se preguntan cuáles serán los valores de entrada y los valores iniciales, los cuáles son las variables necesarias para posteriormente elaborar la Orientación Relativa, la cual arroja unos resultados o valores finales. En base a este esquema se elaboraron los dos siguientes diagramas (*Diagrama 1 y 2*), en donde se desglosa con mayor detalles lo que ocurre dentro del procedimiento del cálculo de la Orientación Relativa y como son finalmente mostrados los resultados, para su posterior implementación en la herramienta de Microstation.



*Diagrama 2. Proceso de Orientación Relativa.
(Elaboración Propia)*

Como se observa, aquí se explica con mayor detalle el proceso de orientación absoluta, en donde son aplicadas las formulas anteriormente descritas y desarrolladas en Excel. Esta es la parte principal de la aplicación, son estos resultados los que permiten trabajar con las imágenes obtenidas.



*Diagrama 3. Presentación de Resultados e Implementación de la Herramienta.
(Elaboración Propia)*

En este diagrama de programación se presenta la obtención y presentación de los resultados finales obtenidos, los cuales, una vez que hayan sido hallados correctamente, deberán ser aplicados sobre la imagen derecha, esto se logra sobre la plataforma de Microstation, es por esta razón que la rutina se denota como Implementación, ya que en esta etapa son llevados a cabo los procesos desarrollados en el lenguaje de VBA.

En base a los diagramas presentados se elaboró la codificación de la aplicación, paso a paso como se describe en esta etapa lógica.

3.6. Diseño Físico de la Aplicación.

3.6.1. Codificación del Diagrama de Flujo.

En base a los conocimientos previamente adquiridos acerca de la forma y el lenguaje de programación se escribió el código de la aplicación, como se dijo anteriormente, se decidió estructurarlo en diferentes módulos, según las funciones de cada uno, e ir llamando a las funciones dentro de éstos según era necesario.

3.6.2. Prueba y Depuración.

La Prueba se realiza tras la compilación, lo que significa ejecutar el programa. Si tras la compilación se presentan errores en el programa fuente, es preciso volver a editar el programa, corregir los errores y compilar de nuevo, este proceso se repite hasta que no se producen errores. Ahora bien, a medida que se escribió el código se iban realizando diversas pruebas con la finalidad de corroborar que no se presentara ningún error.

Ese procedimiento de encontrar y corregir esos errores se llama Depuración, durante el cual se presentaron los siguientes escenarios:

- Problemas debido a la mala sintaxis del código, lo que se conoce como Errores de Compilación, los cuales eran sencillos de corregir, ya que en los manuales se podía conocer la forma correcta de escribir la instrucción respectiva.
- Errores en alguna fórmula, procedimiento o instrucción, lo que se conoce como Errores de Ejecución, éstos fueron más complicados de corregir, pero el compilador indicaba dónde se estaba cometiendo el error, por lo que había que corroborar que la fórmula se encontrara bien escrita y no presentará ninguna incoherencia.
- Por último los más complicados eran cuando el compilador no presentaba ningún error pero los valores arrojados por la aplicación no eran correctos, esto se conoce como Errores Lógicos, había que revisar todo el programa para poder detectar la falla o error.

Así como se obtienen diversos errores durante la elaboración de la aplicación, también se obtienen errores una vez finalizada la misma, se realizaron pruebas empleando las imágenes del Panteón, el cual forma parte del producto final de este proyecto, cuyos resultados se observan en el capítulo siguiente, lo que permitió corroborar que el programa se encontrara correctamente elaborado.

3.6.3. Implementación de la Aplicación.

Durante esta etapa se implementó la aplicación desarrollada a la plataforma de Microstation® para poder utilizar la misma sobre las imágenes del panteón adquiridas previamente.

La implementación consistió en aplicar los valores de rotación hallados con la aplicación (ω , ϕ y κ) a las imágenes del panteón tomadas durante el levantamiento de información, esto se logró con otra rutina de programación, que permite la interacción entre la plataforma de VBA y Microstation®.

En esta etapa se elaboró un análisis de las precisiones a obtener con la herramienta, esto se consigue analizando la relación o escala existente entre el plano imagen y el plano real o del terreno, así fue posible conocer cuánto representa una magnitud imagen en la realidad. Ocurre que en esta aplicación se trabaja inicialmente con coordenadas reales, por lo que no es necesario calcular las coordenadas modelo, ante esta situación se tuvo especial cuidado en lo que respecta a esto y al tratamiento de las unidades, ya que si no se respetaban ciertas condiciones, los errores podrían ser inadmisibles.

Esta fase establece la culminación de la herramienta; al funcionar todo correctamente y que los valores y precisiones obtenidas sean las esperadas se completó la elaboración de la aplicación.

3.6.4. *Elaboración del Manual de Usuario.*

Tras la finalización de la aplicación y su puesta en prueba, se procedió a la elaboración del manual respectivo, el cual se encuentran en los anexos de este Trabajo Especial de Grado.

Para la elaboración de este se repitió paso a paso todas las opciones que presentaba la aplicación (con cada una de sus restricciones), a medida que se transcribían cada una de las instrucciones que el usuario debe seguir, incluyendo posibles dudas.

CAPÍTULO IV RESULTADOS Y ANÁLISIS

En este capítulo se presenta el análisis de cada una de las etapas del esquema metodológico de este trabajo especial de grado. En la fase de documentación se hará énfasis en la información bibliográfica recogida, así como también en la importancia que tiene la fotogrametría. Seguidamente, en la fase del levantamiento de información se analizarán las imágenes obtenidas y los valores del levantamiento topográfico serán ilustrados. Posteriormente, en la etapa de logística y preparación, se especificará los valores obtenidos por las fórmulas y el análisis respectivo. Finalmente, se hará énfasis en el desarrollo de la aplicación, los obstáculos que se presentaron y el beneficio de la tecnología desarrollada frente a otras tecnologías existentes.

4.1. Documentación: Adquisición de Información Bibliográfica.

Las tecnologías fotogramétricas hoy en día han asumido un importante rol para la ingeniería y cartografía, ya que permite la elaboración de mapas, análisis estructurales, cálculos de volúmenes de terreno, elaboración de modelos digitales de elevación, estudios arqueológicos, mantenimiento de estructuras, reconstrucción de elementos que fueron destruidos, entre otros, todo esto de una forma más práctica, precisa y en menor tiempo. Aunado a esto, su accesibilidad a nivel mundial aumenta, a medida que su tecnología también lo hace, ya que en muchos casos es posible emplear instrumentos de menor costo pero que también ofrezcan resultados satisfactorios, sin incluir a la gran cantidad de *softwares* disponibles en el mercado.

Frente a este panorama es importante comprender el creciente interés de muchos profesionales por simplificar sus labores mediante estas técnicas, por lo que en muchos países se han desarrollado diversos equipos y programas de trabajo, como lo es el Láser. Esto es muestra de lo conveniente que puede resultar trabajar con los beneficios que ofrece la fotogrametría.

La investigación teórica por su parte sirvió para aclarar y afianzar muchos de los conocimientos obtenidos a lo largo de la carrera. Uno de los puntos que fue indispensable entender a cabalidad fue la lógica de la Fotogrametría Analítica y su aplicación a un caso real, ya que debido a la cantidad de expresiones matemáticas que contiene es difícil entender con claridad su aplicabilidad. Sus funciones son infinitas, ya que puede ser utilizada tanto en fotogrametría terrestre como fotogrametría aérea, pero requiere de buenos controles para reducir las imprecisiones.

Por otro lado fue posible conocer acerca de la gran diversidad de plataformas de desarrollo existentes, lo que ratifica una vez más la modernización y tecnificación global de metodologías de trabajo que anteriormente eran muy tediosas.

4.2. Levantamiento de Información.

La siguiente fase del desarrollo del tema estuvo comprendida por sub. fases que permitieron la recopilación de aquellos datos de campo. Dichas sub. fases son:

4.2.1. Toma de Imágenes.

Se realizaron diversas tomas desde cada punto, las cuales fueron almacenadas en formato JPG de alta calidad, así como en formato RAW, aquí se mostrarán las imágenes que fueron utilizadas para la puesta en práctica de la aplicación, consideradas como las que presentan las mejores características o condiciones. Las dimensiones de las imágenes en píxeles son de 2848 x 4288 y corresponden a las que se muestran a continuación (*Figura 49 y 50*):



*Figura 48. Imagen del Panteón Nacional tomada desde la Estación Derecha.
(Elaboración Propia)*



*Figura 49. Imagen del Panteón Nacional tomada desde la Estación Izquierda.
(Elaboración Propia)*

4.2.2. Levantamiento Topográfico.

En el levantamiento topográfico los valores de coordenadas de los puntos medidos son las siguientes:

Estación	Punto	Norte	Este	Cota	Descripción
Vértice 1	1	1032.453	1000.000	1002.743	Ref. Atrás
	2	1051.972	1034.908	1002.589	Referencia
	3	984.333	999.695	999.593	Referencia
	4	981.414	1060.361	1021.805	Pto. Central Panteón
	5	988.143	1051.692	1009.991	Estruc.
	6	980.895	1049.406	1010.007	Estruc.
	7	985.084	1051.172	1015.846	Estruc.
	8	983.699	1050.740	1015.844	Estruc.
	9	985.243	1051.567	1024.404	Estruc.
	10	983.304	1050.988	1024.391	Estruc.
	11	984.238	1051.423	1029.548	Estruc.
	12	984.247	1051.437	1033.922	Estruc.
	13	995.089	1061.272	1008.060	Estruc.
	14	992.314	1060.404	1003.950	Estruc.
	15	993.936	1060.982	1017.482	Estruc.
	16	969.659	1053.285	1003.995	Estruc.
	17	970.327	1055.028	1027.496	Estruc.
	Vértice 2	18	1010.342	1003.154	1000.004
Vértice 1		1000.00	1000.00	1000.00	Ref. Atrás
19		988.137	1051.684	1010.002	Estruc.
20		980.884	1049.397	1010.021	Estruc.
21		985.076	1051.167	1015.859	Estruc.
22		983.683	1050.733	1015.874	Estruc.
23		985.240	1051.531	1024.459	Estruc.
24		983.300	1050.954	1024.448	Estruc.
25		984.214	1051.410	1029.559	Estruc.
26		984.233	1051.431	1033.943	Estruc.
27		995.076	1061.269	1008.069	Estruc.
28		992.298	1060.397	1003.955	Estruc.
29		993.909	1060.963	1017.508	Estruc.
30		969.646	1053.276	1004.007	Estruc.
31	970.310	1055.008	1027.512	Estruc.	

Tabla 6. Coordenadas de puntos medidos sobre la estructura del Panteón.
(Elaboración Propia)

Las coordenadas de las estaciones de toma o vértices son las que se muestran en la siguiente tabla:

Coordenadas de los Vértices de Toma o Estaciones			
Punto	Norte	Este	Cota
Vértice 1	1000.000	1000.000	1000.000
Vértice 2	1010.342	1003.154	1000.004

Las coordenadas del vértice inicial, donde se estableció la primera estación (vértice 1), fueron colocadas arbitrariamente, ya que con este programa lo que se quiere es obtener coordenadas reales, sin importar cual sea su valor, por esta razón se estableció un origen cualquiera. El hecho de que esto ocurra así no afecta los resultados que se obtengan con la aplicación desarrollada, estos valores son meramente ilustrativos con el fin de demostrar que el programa funciona correctamente.

Una de las maneras en las que se corroboró que las mediciones fueron realizadas correctamente, fue mediante la comparación de coordenadas que se encontraban sobre el mismo lugar en la estructura, medidas en ambos vértices, la diferencia de entre estos resultados debe ser mínima. Esta comparación se muestra en la siguiente tabla:

Diferencias entre los Puntos medidos sobre la Estructura					
Punto		Dif Norte	Dif Este	Dif Lineal Norte Este	Dif Cota
I. Derecha	I Izquierda				
5	19	0.006	0.008	0.010	0.011
6	20	0.011	0.009	0.014	0.014
7	21	0.008	0.005	0.009	0.013
8	22	0.016	0.007	0.017	0.03
9	23	0.003	0.036	0.036	0.055
10	24	0.004	0.034	0.034	0.057
11	25	0.024	0.013	0.027	0.011
12	26	0.014	0.006	0.015	0.021
13	27	0.013	0.003	0.013	0.009
14	28	0.016	0.007	0.017	0.005
15	29	0.027	0.019	0.033	0.026
16	30	0.013	0.009	0.016	0.012
17	31	0.017	0.020	0.026	0.016

Tabla 7. Diferencias de Coordenadas de los mismos puntos en estaciones diferentes . (Elaboración Propia)

Observando estos valores se considera que las discrepancias existentes son menores, encontrándose estas en el rango de los centímetros, lo que indica que las coordenadas fueron medidas correctamente, por lo que pueden ser empleadas en la implementación de la aplicación, utilizando la estructura del Panteón como elemento a orientar.

Estas coordenadas medidas en campo, fueron utilizadas al inicio de la aplicación, durante la inserción de las imágenes en Microstation®, donde se definen las coordenadas terrestres de ciertos puntos sobre la imagen, para obtener la Orientación Absoluta, por lo que gracias a esto es posible trabajar desde el comienzo con medidas reales, evitando así tener que realizar el cálculo de coordenadas modelo. Por esta razón es importante verificar que las mediciones de campo sean llevadas a cabo correctamente, ya que de las precisiones de éstas dependen las presiones de los resultados finales.

4.3. Logística y Preparación.

4.3.1. Desarrollo de los procedimientos en la Herramienta Excel.

Una vez desarrollados los procedimientos en Excel, empleando los datos del ejemplo mostrado anteriormente (3.3.3), se obtuvieron diversos resultados: en el caso de la Orientación Relativa, en cada iteración surgieron nuevos valores de omega, phi y kappa de la imagen derecha, así como una nueva matriz de rotación y de datos también de esta imagen; luego en el caso del Cálculo de Coordenadas Modelo, empleando los parámetros antes nombrados, se obtuvieron los valores de la base z y la base y, además de las coordenadas imagen de todo el modelo, por último, empleando ahora los datos del otro ejemplo, se hizo el cálculo de las coordenadas terrestres durante el proceso de Orientación Absoluta.

Siguiendo este orden, se mostrarán a continuación los resultados:

❖ **Orientación Relativa:**

Es importante tener presente que los valores de omega, phi y kappa de la imagen izquierda (imagen identificada como 1) siempre serán los mismos que hayan sido definidos por el usuario al inicio de la iteración, ya que el método que se emplea así lo considera ($\omega_1 = \phi_1 = \kappa_1 = 0$), por lo que la matriz datos y la matriz de rotación de esta imagen se mantienen igual en cada iteración.

Debido a esto, los valores que se mostrarán a continuación obtenidos en cada iteración serán los de la imagen derecha (imagen identificada como 2), ya que son los valores que se modifican.

Los valores iniciales introducidos por el usuario son los siguientes:

Valores iniciales (radianes)	
$\omega^1_0 = 0$	$f = 100.8$
$\phi^1_0 = 0$	$bx = 0.8$
$\kappa^1_0 = 0$	$\beta y = 0$
$\omega^2_0 = 0$	$\beta z = 0$
$\phi^2_0 = 0$	
$\kappa^2_0 = 0$	

Tabla 8. Valores Iniciales O. Relativa.
(Elaboración Propia)

➤ Primera Iteración:

Diferenciales (radianes)	
0	$= d\beta y$
0	$= d\beta z$
0	$= d\omega^2$
0	$= d\phi^2$
0	$= d\kappa^2$

Tabla 9. Matriz de Diferenciales, Primera Iteración O. Relativa
(Elaboración Propia)

Nuevos Valores iniciales (radianes)	
$\omega^1_1 = 0$	$f = 100.8$
$\phi^1_1 = 0$	$bx = 0.8$
$\kappa^1_1 = 0$	$\beta y = 0$
$\omega^2_1 = 0$	$\beta z = 0$
$\phi^2_1 = 0$	
$\kappa^2_1 = 0$	

Tabla 10. Nuevos Valores Iniciales, Primera Iteración O. Relativa
(Elaboración Propia)

Matriz Rotación		
1.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
0.00E+00	1.00E+00	0.00E+00
0.00E+00	0.00E+00	1.00E+00

Tabla 11. Matriz de Rotación, Primera Iteración O. Relativa
(Elaboración Propia)

Punto	Matriz Datos (Coordenadas leídas sobre los fotogramas) (mm)					
	x'	y'	z'	x''	y''	z''
1	12.400	-1.113	-100.800	-2.556	-1.128	-100.800
2	22.618	-12.826	-100.800	7.748	-12.903	-100.800
3	-3.255	-18.263	-100.800	-19.009	-18.383	-100.800
4	-3.124	-1.307	-100.800	-18.128	-1.335	-100.800
5	-3.075	16.750	-100.800	-18.170	16.826	-100.800
6	21.507	37.775	-100.800	7.570	38.003	-100.800
7	12.654	52.584	-100.800	0.719	52.904	-100.800
8	-13.299	-13.175	-100.800	-28.278	-13.234	-100.800

Tabla 12. Nueva Matriz de Datos, Primera Iteración O. Relativa
(Elaboración Propia)

➤ Segunda Iteración

Diferenciales (radianes)	
0.016151971	= $d\beta_y$
-0.035524087	= $d\beta_z$
-0.002261638	= $d\omega^2$
0.002143957	= $d\phi^2$
7.21641E-05	= $d\kappa^2$

Tabla 13 Matriz de Diferenciales, Segunda Iteración O. Relativa
(Elaboración Propia)

Nuevos Valores iniciales (radianes)			
$\omega^1_2 =$	0	$f =$	100.8
$\phi^1_2 =$	0	$bx =$	0.8
$\kappa^1_2 =$	0	$\beta_y =$	0.01615197
$\omega^2_2 =$	-0.0022616	$\beta_z =$	-0.03552409
$\phi^2_2 =$	0.00214396		
$\kappa^2_2 =$	0.00007216		

Tabla 14. Nuevos Valores Iniciales, Segunda Iteración O. Relativa
(Elaboración Propia)

Matriz Rotación		
9.99998E-01	-7.21639E-05	2.14396E-03
6.73151E-05	9.99997E-01	2.26163E-03
-2.14411E-03	-2.26148E-03	9.99995E-01

Tabla 15. Matriz de Rotación, Segunda Iteración O. Relativa
(Elaboración Propia)

Punto	Matriz Datos (Coord. nuevas leídas sobre los fotogramas) (mm)					
	x'	y'	z'	x''	y''	z''
1	12.400	-1.113	-100.800	-2.772	-1.356	-100.791
2	22.618	-12.826	-100.800	7.533	-13.130	-100.787
3	-3.255	-18.263	-100.800	-19.224	-18.612	-100.717
4	-3.124	-1.307	-100.800	-18.344	-1.564	-100.758
5	-3.075	16.750	-100.800	-18.387	16.597	-100.799
6	21.507	37.775	-100.800	7.351	37.775	-100.902
7	12.654	52.584	-100.800	0.499	52.676	-100.921
8	-13.299	-13.175	-100.800	-28.493	-13.464	-100.709

Tabla 16. Nueva Matriz de Datos, Segunda Iteración O. Relativa
(Elaboración Propia)

➤ Tercera Iteración

Diferenciales (radianes)	
-0.000312106	= $d\beta_y$
0.00045269	= $d\beta_z$
1.2522E-07	= $d\omega^2$
-6.46737E-06	= $d\phi^2$
-7.44362E-05	= $d\kappa^2$

Tabla 17 Matriz de Diferenciales, Tercera Iteración O. Relativa
(Elaboración Propia)

Nuevos Valores iniciales (radianes)			
$\omega_3^1 =$	0	$f =$	100.8
$\phi_3^1 =$	0	$bx =$	0.8
$\kappa_3^1 =$	0	$\beta_y =$	0.01583986
$\omega_3^2 =$	-0.0022615	$\beta_z =$	-0.0350714
$\phi_3^2 =$	0.00213749		
$\kappa_3^2 =$	-0.00000227		

Tabla 18. Nuevos Valores Iniciales, Tercera Iteración O. Relativa
(Elaboración Propia)

Matriz Rotación		
9.99998E-01	2.27207E-06	2.13749E-03
-7.10602E-06	9.99997E-01	2.26151E-03
-2.13748E-03	-2.26152E-03	9.99995E-01

Tabla 19. Matriz de Rotación, Tercera Iteración O. Relativa
(Elaboración Propia)

Punto	Matriz Datos (Coord. nuevas leídas sobre los fotogramas) (mm)					
	x'	y'	z'	x''	y''	z''
1	12.400	-1.113	-100.800	-2.987	-1.584	-100.782
2	22.618	-12.826	-100.800	7.317	-13.358	-100.773
3	-3.255	-18.263	-100.800	-19.439	-18.840	-100.634
4	-3.124	-1.307	-100.800	-18.559	-1.792	-100.714
5	-3.075	16.750	-100.800	-18.603	16.369	-100.796
6	21.507	37.775	-100.800	7.136	37.547	-101.002
7	12.654	52.584	-100.800	0.283	52.448	-101.040
8	-13.299	-13.175	-100.800	-28.708	-13.691	-100.617

Tabla 20. Nueva Matriz de Datos, Tercera Iteración O. Relativa
(Elaboración Propia)

➤ Cuarta Iteración

Diferenciales (radianes)	
-2.48515E-05	= $d\beta_y$
3.79433E-05	= $d\beta_z$
0.002265072	= $d\omega^2$
-0.002137933	= $d\phi^2$
-7.73946E-05	= dk^2

Tabla 21. Matriz de Diferenciales, Cuarta Iteración O. Relativa
(Elaboración Propia)

Nuevos Valores iniciales (radianes)			
$\omega^1_4 =$	0	$f =$	100.8
$\phi^1_4 =$	0	$bx =$	0.8
$\kappa^1_4 =$	0	$\beta y =$	0.01581501
$\omega^2_4 =$	3.5586E-06	$\beta z =$	-0.03503345
$\phi^2_4 =$	-4.44E-07		
$\kappa^2_4 =$	-7.967E-05		

Tabla 22. Nuevos Valores Iniciales, Cuarta Iteración O. Relativa
(Elaboración Propia)

Matriz Rotación		
1.00000	0.00008	0.00000
-0.00008	1.00000	0.00000
0.00000	0.00000	1.00000

Tabla 23. Matriz de Rotación, Cuarta Iteración O. Relativa
(Elaboración Propia)

Punto	Matriz Datos (Coord. nuevas leídas sobre los fotogramas) (mm)					
	x'	y'	z'	x''	y''	z''
1	12.400	-1.113	-100.800	-2.988	-1.583	-100.782
2	22.618	-12.826	-100.800	7.316	-13.359	-100.773
3	-3.255	-18.263	-100.800	-19.440	-18.838	-100.634
4	-3.124	-1.307	-100.800	-18.559	-1.790	-100.714
5	-3.075	16.750	-100.800	-18.601	16.371	-100.796
6	21.507	37.775	-100.800	7.139	37.547	-101.002
7	12.654	52.584	-100.800	0.288	52.448	-101.040
8	-13.299	-13.175	-100.800	-28.709	-13.689	-100.617

Tabla 24. Nueva Matriz de Datos, Cuarta Iteración O. Relativa
(Elaboración Propia)

➤ Quinta Iteración

Diferenciales (radianes)	
9.92211E-06	= $d\beta_y$
-2.82157E-05	= $d\beta_z$
0.002259956	= $d\omega^2$
-0.002139586	= $d\phi^2$
6.98607E-06	= $d\kappa^2$

Tabla 25. Matriz de Diferenciales, Quinta Iteración O. Relativa
(Elaboración Propia)

Nuevos Valores iniciales (radianes)			
$\omega^1_5 =$	0	$f =$	100.8
$\phi^1_5 =$	0	$bx =$	0.8
$\kappa^1_5 =$	0	$\beta_y =$	0.01582493
$\omega^2_5 =$	0.00226351	$\beta_z =$	-0.03506167
$\phi^2_5 =$	-0.00214		
$\kappa^2_5 =$	-7.268E-05		

Tabla 26. Nuevos Valores Iniciales, Quinta Iteración O. Relativa
(Elaboración Propia)

Matriz Rotación		
1.00000	0.00007	-0.00214
-0.00008	1.00000	-0.00226
0.00214	0.00226	1.00000

Tabla 27. Matriz de Rotación, Primera Iteración O. Relativa
(Elaboración Propia)

Punto	Matriz Datos (Coord. nuevas leídas sobre los fotogramas) (mm)					
	x'	y'	z'	x''	y''	z''
1	12.400	-1.113	-100.800	-2.772	-1.355	-100.791
2	22.618	-12.826	-100.800	7.531	-13.131	-100.787
3	-3.255	-18.263	-100.800	-19.226	-18.609	-100.717
4	-3.124	-1.307	-100.800	-18.344	-1.561	-100.758
5	-3.075	16.750	-100.800	-18.384	16.600	-100.799
6	21.507	37.775	-100.800	7.357	37.775	-100.901
7	12.654	52.584	-100.800	0.508	52.676	-100.920
8	-13.299	-13.175	-100.800	-28.495	-13.459	-100.709

Tabla 28. Nueva Matriz de Datos, Quinta Iteración O. Relativa
(Elaboración Propia)

Análisis de los valores obtenidos en las iteraciones de la Orientación Relativa

Los resultados de cada una de las iteraciones son bastante similares entre sí, en la aplicación elaborada el número de repeticiones es mucho mayor que el desarrollado en Excel, esto por razones evidentes de la facilidad que presenta la aplicación para elaborar varias, a medida que se elaboraba cada iteración se calcularon las diferencias entre cada uno de los resultados de los valores iniciales obtenidos, esas diferencias o discrepancias se presentan a continuación:

$\omega_2 - \omega_1$	-0.00226	$\omega_3 - \omega_2$	0.0000001
$\phi_2 - \phi_1$	0.00214	$\phi_3 - \phi_2$	-0.0000065
$\kappa_2 - \kappa_1$	0.00007	$\kappa_3 - \kappa_2$	-0.0000744
$by_2 - by_1$	0.01615	$by_3 - by_2$	-0.0003121
$bz_2 - bz_1$	-0.03552	$bz_3 - bz_2$	0.0004527

$\omega_4 - \omega_3$	0.00227	$\omega_5 - \omega_4$	0.002260
$\phi_4 - \phi_3$	-0.00214	$\phi_5 - \phi_4$	-0.002140
$\kappa_4 - \kappa_3$	-0.00008	$\kappa_5 - \kappa_4$	0.000007
$by_4 - by_3$	-0.00002	$by_5 - by_4$	0.000010
$bz_4 - bz_3$	0.00004	$bz_5 - bz_4$	-0.000028

Como se puede observar las diferencias entre los valores obtenidos de cada iteración son bien reducidas, lo que indica que el proceso de Orientación Relativa es llevado a cabo correctamente, se debe estar muy atento ante los resultados que se obtengan, ya que en muchas ocasiones puede que las diferencias sean más grandes, lo que necesariamente no indica que se esté trabajando de manera incorrecta, se debe seguir iterando para poder conocer si el proceso se ha llevado a cabo correctamente.

Por esta razón en la aplicación la iteración es condicionada por dos factores: que se obtenga cierta precisión en la proximidad de los valores de los parámetros de orientación relativa obtenidos, o luego de un cierto número de iteraciones, que en el caso de este proyecto fue definido como cincuenta (50). Esto se realiza con el fin de asegurar la precisión en los resultados, lo que se traduce también en precisión sobre todo el modelo en coordenadas terrestres.

❖ **Cálculo de Coordenadas Modelo**

En esta etapa, con los valores hallados durante la orientación relativa, se calcularon los valores de la Base z (b_z) y la Base y (b_y), para hallar las coordenadas del modelo formado por las dos imágenes. Esta etapa no fue necesaria llevarla a cabo, ya que, como se ha explicado anteriormente, la aplicación trabaja desde el principio en coordenadas reales, sin tener que calcular previamente estas coordenadas. Los valores hallados mediante este procedimiento en Excel son los siguientes:

Partiendo de los valores obtenidos previamente:

Valores iniciales

$\omega 1 =$	0	$F =$	100.8
$\phi 1 =$	0	$b_x =$	0.8
$\kappa 1 =$	0	$\beta_y =$	0.0158249
$\omega 2 =$	0.0022635	$\beta_z =$	-0.035062
$\phi 2 =$	-0.00214		
$\kappa 2 =$	-7.27E-05		

Tabla 29. Resultados Obtenidos de la Orientación Relativa.
(Elaboración Propia)

Se realizó en primer lugar el cálculo de b_y y b_z , cuyos valores obtenidos fueron:

Calculo de Bases	
$b_y =$	0.0126599
$b_z =$	-0.028049

Tabla 30. Valores de la base z y la base y del ejemplo desarrollado en Excel.
(Elaboración Propia)

Una vez hallados estos valores, se procedió a calcular las coordenadas modelo del estereopar, cuyos resultados fueron:

PTO	Valores de μ y λ		Coordenadas Modelo		
	μ	λ	x	y	z
1	0.05250	0.05278	0.654	-0.059	-5.320
2	0.05262	0.05303	1.199	-0.679	-5.331
3	0.05014	0.05004	-0.163	-0.917	-5.078
4	0.05262	0.05254	-0.164	-0.069	-5.329
5	0.05231	0.05225	-0.161	0.878	-5.301
6	0.05603	0.05651	1.215	2.132	-5.682
7	0.06549	0.06586	0.833	3.463	-6.638
8	0.05285	0.05256	-0.699	-0.696	-5.350

Tabla 31. Coordenadas del Modelo del ejemplo desarrollado en Excel.
(Elaboración Propia)

Análisis del Cálculo de Coordenadas del Modelo

En esta fase se obtienen los valores de las bases z e y , en función de las componentes angulares de la base halladas previamente, así como las coordenadas modelo.

El cálculo de las bases no es mas que una sencilla multiplicación, y para hallar los valores de las coordenadas del modelo, fue necesario calcular en primer lugar los factores de escala para cada punto del modelo (λ y μ) y en función de estos obtener finalmente las coordenadas modelo.

Los valores que se obtienen aquí son los que serán utilizados posteriormente en la orientación absoluta para hallar las coordenadas terreno. Esta etapa no fue desarrollada en la aplicación creada, ya que, como se ha mencionado en varias oportunidades del presente trabajo, gracias a las bondades del programa Microstation® es posible obviar esta etapa y trabajar con coordenadas reales desde el comienzo.

❖ Orientación Absoluta

La orientación absoluta se realizó con la finalidad de llevar el modelo imagen a un modelo de coordenadas reales o terrestres, para esto se realizaron diversos procesos de iteración con la finalidad de hallar los giros, las traslaciones o desplazamientos y el factor de escala que se debe aplicar al modelo imagen para llevarlo al plano real.

A continuación se mostrarán los resultados obtenidos de estos siete parámetros (Ω , Φ , κ , T_x , T_y , T_z y λ) en cada una de las iteraciones y en base a estos se mostrarán las precisiones y los datos de coordenadas corregidos del ejemplo de Orientación Absoluta ilustrado en la *tabla 4* del capítulo anterior.

➤ Primera Iteración:

Parámetros	
$\lambda_1=$	0.9895
$\Omega_1=$	-0.0164
$\phi_1=$	0.0137
$K_1=$	-0.0315
$T_{X1} =$	728756.0262
$T_{Y1} =$	311025.3045
$T_{Z1} =$	148.3633

Tabla 32. Parámetros de Orientación Absoluta de la Primera Iteración.
(Elaboración Propia)

➤ Segunda Iteración:

Parámetros	
$\lambda_2=$	0.9896
$\Omega_2=$	-0.0164
$\phi_2=$	0.0137
$K_2=$	-0.0315
$T_{X2} =$	728756.0185
$T_{Y2} =$	311025.3423
$T_{Z2} =$	148.3840

Tabla 33 Parámetros de Orientación Absoluta de la Segunda Iteración.
(Elaboración Propia)

➤ Tercera Iteración:

Parámetros	
$\lambda_3=$	0.9895
$\Omega_3=$	-0.0164
$\phi_3=$	0.0137
$K_3=$	-0.0315
$T_{X3} =$	728756.0185
$T_{Y3} =$	311025.3423
$T_{Z3} =$	148.3840

Tabla 34 Parámetros de Orientación Absoluta de la Tercera Iteración.
(Elaboración Propia)

- Cálculo de las Coordenadas Corregidas y Precisiones.

PARA EL PUNTO Nº 1				
Coord.		Precisión		$(V_i)^2$
728774.630	X_1^C	0.08109	Vx_1	0.006576
311483.502	Y_1^C	-0.10457	Vy_1	0.010934
354.143	Z_1^C	-0.04354	Vz_1	0.001896

Tabla 35. Valores de Orientación Absoluta para el Punto nº 1.
(Elaboración Propia)

PARA EL PUNTO Nº 2				
Coord.		Precisión		$(V_i)^2$
729171.949	X_1^C	-0.1332	Vx_1	0.01774
311471.682	Y_1^C	-0.1485	Vy_1	0.02206
352.764	Z_1^C	-0.0615	Vz_1	0.00378

Tabla 36. Valores de Orientación Absoluta para el Punto nº 2.
(Elaboración Propia)

PARA EL PUNTO Nº 3				
Coord. Terrestres		Precisión		$(V_i)^2$
728747.759	X_1^C	-0.04378	Vx_1	0.001916
310593.315	Y_1^C	0.10477	Vy_1	0.010976
372.034	Z_1^C	-0.06943	Vz_1	0.004821

Tabla 37 Valores de Orientación Absoluta para el Punto nº 3.
(Elaboración Propia)

PARA EL PUNTO Nº 4				
Coord. Terrestres		Precisión		$(V_i)^2$
729141.071	X_1^C	-0.1204	Vx_1	0.01451
310561.328	Y_1^C	0.0847	Vy_1	0.00717
362.557	Z_1^C	-0.0454	Vz_1	0.00206

Tabla 38 Valores de Orientación Absoluta para el Punto nº 4.
(Elaboración Propia)

Análisis de los Datos obtenidos en la Orientación Absoluta:

Para evaluar si los resultados de esta Orientación son admisibles, hace falta sólo con evaluar las precisiones presentadas. Si se observan los resultados obtenidos, se puede concluir que los valores están dentro de los rangos esperados en este tipo de procedimientos, por lo que los parámetros hallados podrían ser aplicados al modelo y obtener buenos resultados.

Este procedimiento tampoco fue programado en la aplicación, ya que se realiza al comienzo, durante la inserción de la imagen en Microstation®.

4.3.2. Calibración de la Cámara.

Reporte Final de la Calibración automática

Los valores del reporte final de la calibración de la cámara **Nikon D90** son los siguientes:

Número de iteraciones procesadas	3
Número de etapas procesadas	2
Error inicial	2,912 mm
Error final	2,911 mm

*Tabla 39. Error Total de la Calibración
(Elaboración Propia. Referencia:Photomodeler®)*

Longitud de la focal	18.954147 mm
Desviación estándar de la focal	0.003 mm
X del punto principal (Xp)	12.042773 mm
Desviación estándar de Xp	0.002 mm
Y del punto principal (Yp)	7.958279 mm
Desviación estándar de Yp	0.002 mm
Ancho del Formato (Fw)	24.014894 mm
Desviación estándar de Fw	4.1e-004 mm
Alto del Formato	15.940299 mm
Distorsión radial K1	4.796e-004
Desviación estándar de K1	2.2e-006
Distorsión radial K2	-7.150e-007
Desviación estándar de K2	1.3e-008

Distorsión Radial K3	0.000e+000
Distorsión tangencial P1	-0.001052
Desviación estándar de P1	1.4e-006
Distorsión tangencial P2	-0.001037
Desviación estándar de P2	1.5e-006

*Tabla 40. Precisiones/ Desviaciones Estándar de la Calibración de la Cámara.
(Elaboración Propia. Referencia:Photomodeler®)*

Promedio del Error Medio Cuadrático (EMC)	0.361 pixeles
Máximo	3.026 pixeles
Mínimo	0.230 pixeles
Máximo del EMC	1.390 pixeles
Mínimo del EMC	0.133 pixeles

*Tabla 41. Residuales de las Marcas de los puntos.
(Elaboración Propia. Referencia:Photomodeler®)*

Máximo ajuste	0.0024 m
Mínimo ajuste	0.00022 m

*Tabla 42. Ajuste de puntos.
(Elaboración Propia. Referencia:Photomodeler®)*

Longitud total del vector EMC	0.00015 m
Vector EMC más largo	0.000206 m
Punto con el vector EMC más largo	Punto 282
Vector EMC más corto	0.000142 m
Punto con el vector EMC más corto	Punto 98
X Máximo	8.45e-005 m
Y Máximo	9.45e-005 m
Z Máximo	0.000171 m
X Mínimo	4.97e-005 m
Y Mínimo	4.85e-005 m
Z Mínimo	0.00012 m

*Tabla 43. Precisiones de los Puntos
(Elaboración Propia. Referencia:Photomodeler®)*

Análisis de los resultados (tablas 39 a 43) obtenidos de la Calibración Automática

Esta calibración se elabora como lo que vendría a ser la Orientación Interior de la cámara, que en este proyecto no se desarrolla, porque no forma parte de los objetivos, pero como se dijo anteriormente, es importante conocer las precisiones sobre las que se trabaja en este aspecto.

Para la calibración se emplearon las 12 fotos que se adquirieron, a pesar de que Photomodeler® puede trabajar solo con 6 fotos, en este caso el programa fue capaz de identificar la cantidad suficiente de puntos en todas las imágenes del patrón adquiridas.

La *tabla 40* de desviaciones estándar en la calibración de la cámara fue obtenida en el proceso de orientación interna. Todos estos valores representan las condiciones del lente de la cámara y las características de la imagen. Como se observa, allí se encuentra el formato de la imagen (alto x ancho), el cual se empleó para introducir la imagen en Microstation®, al inicio de la aplicación. De igual forma en esta tabla se encuentra la longitud de la focal, que también fue necesaria para establecer las condiciones de toma de las imágenes en el programa Microstation®, así como las coordenadas de los puntos principales, que se emplean en la ubicación de las estaciones de toma de las imágenes.

Las precisiones obtenidas en el proceso de orientación interna expresadas en metros se observan en la *tabla 43*.

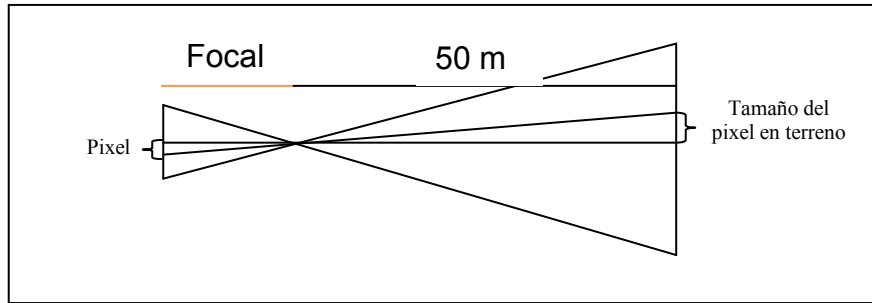
El valor promedio del residual del EMC arrojado por la marcación de los puntos fue de *0.361 píxeles*, que implica un error aproximado en terreno de 0.533 cm en ancho del píxel y 0.569 en alto del píxel, cuya magnitud se obtuvo de las relaciones trigonométricas siguientes:

- Primero se calculo el tamaño de un píxel en la imagen:

$$\text{ancho del pixel en mm} = \frac{\text{ancho de la foto en mm}}{\text{ancho del formato en pix}} = \frac{24.015}{4288} = 0.0056 \text{ mm}$$

$$\text{alto del pixel en mm} = \frac{\text{alto de la foto en mm}}{\text{alto del formato en pix}} = \frac{15.94}{2848} = 0.00597 \text{ mm}$$

- Luego se calculo el tamaño del píxel en el terreno, utilizando una distancia de 50 m, que es la que había entre la base de los centros de toma de las imágenes y el elemento (Panteón Nacional):



$$\text{ancho del pixel en m} = \frac{\text{distancia} * \text{ancho pixel en mm}}{\text{distancia focal (mm)}} = 0.01477\text{m} = 14.77\text{mm}$$

$$\text{alto del pixel en m} = \frac{\text{distancia} * \text{alto pixel en mm}}{\text{distancia focal (mm)}} = 0.01575\text{m} = 15.75\text{mm}$$

Ancho del formato (mm)	24.014894
Alto del formato (mm)	15.940299

Tabla 44. Datos de formato fotográfico utilizado.
(Elaboración Propia)

Los valores obtenidos son aceptables, ya que para una distancia de 50 m, un error de 0.533 cm en ancho del píxel y 0.569 en alto del píxel no representa ni la mitad de la dimensión del píxel en el terreno, por supuesto que en campo esta imprecisión no depende sólo de esto, existen muchos otros factores que influyen, por lo que seguramente este valor sea mayor, pero para un caso ideal con la cámara Nikon D90 estos valores son aplicables.

4.4. Diseño Físico de la Aplicación.

4.4.1. Codificación del Diagrama de Flujo.

En base a los diagramas de programación antes expuestos, se elaboró el código del programa. Ahora bien, para poder entender que fue lo que se elaboró es necesario mostrar la estructuración del programa, que es la siguiente:

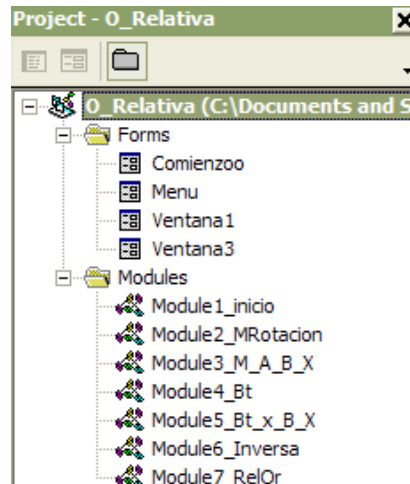


Figura 50. Estructura de la Aplicación.
(Elaboración Propia)

La aplicación se organizó en diferentes Formularios y Módulos, cada uno de ellos tiene un código asignado, y la interfaz gráfica esta compuesta por los formularios que allí se encuentran, estos contienen ciertas rutinas o procedimientos que están desarrollados en los módulos y son llamados según sea necesario.

Cada uno de estos formularios posee diferentes herramientas tales como: botones, etiquetas, listas, entre otras, que poseen a su vez un código asociado y cumplen una función dentro de la estructura del programa.

A continuación, se expondrán los códigos que corresponden con cada uno de los Formularios y posteriormente el código de cada uno de los módulos, ya estos últimos son llamados dentro de los primeros. Primero

se ilustrará cómo es cada uno y luego se colocará el código que le corresponde.

Para los **Formularios**:

➤ Comienzo:



Figura 51. Formulario para el inicio de la aplicación.
(Elaboración Propia)

```
Private Sub CommandButton1_Click()  
Menu.Show vbModeless  
Comienzo.Hide  
End Sub  
  
Private Sub CommandButton2_Click()  
Datos_fotos.Show vbModeless  
Comienzo.Hide  
End Sub
```

Código 1. Inicio de la Aplicación
(Elaboración Propia)

En este formulario de inicio, se presentan dos elecciones para comenzar: una opción que permita cargar las imágenes que posteriormente serán utilizadas en la marcación de puntos durante la orientación relativa y otra para elaborar la orientación, en caso de que se posean las coordenadas imagen o el estereopar haya sido cargado previamente.

Al seleccionar la opción para cargar las imágenes se obtiene el siguiente cuadro de diálogo o formulario:

➤ Datos_Fotos:

The screenshot shows a software window titled "Carga de Fotografias" with a close button in the top right corner. The window is divided into two main sections: "Foto Izquierda" (Left Photo) and "Foto Derecha" (Right Photo). Each section contains a "Centro de Toma" (Center of Shot) sub-section with input fields for X, Y, and Z coordinates, and a "Dimensiones en mm" (Dimensions in mm) sub-section with input fields for Ancho (Width) and Alto (Height). Below these sections, there is a "Focal en mm" (Focal length in mm) field. At the bottom of the window, there are four buttons: "Eliminar Fotos", "Crear Marcos", "Cargar Fotos I-> D", and "Aceptar". A "Cerrar" button is also present at the bottom right.

Parameter	Foto Izquierda	Foto Derecha
X (Centro de Toma)	-1010342	1000000
Y (Centro de Toma)	1003154	1000000
Z (Centro de Toma)	1000004	1000000
Ancho (Dimensiones en mm)	15.940299	15.940299
Alto (Dimensiones en mm)	24.014894	24.014894
Focal en mm	-18.954147	

Figura 52. Formulario para la carga de imágenes del estereopar.
(Elaboración Propia)

A través de este cuadro se introducen las imágenes que se utilizarán posteriormente para la orientación relativa, aquí se definen las dimensiones de las mismas y se introducen las coordenadas de los centros de toma en milímetros, lo que permite obtener la ubicación real de las imágenes cuando fueron tomadas, este paso corresponde a la orientación absoluta del estereopar, ya que al introducir valores de coordenadas reales, las imágenes son ubicadas según estas, por lo que los valores que se adquieren durante la orientación relativa son a su vez en coordenadas reales, por lo que no es necesario realizar posteriormente la orientación absoluta.

El código que corresponde a este formulario se muestra a continuación:

```

Public Sub Borrar_foto_Izq_Click()
ActiveModelReference.SelectElement FOTO_IZQ
CadInputQueue.SendCommand "DELETE ELEMENT "
CommandState.StartDefaultCommand
End Sub


---


Private Sub Buscar_Der_Click()
With Dialogo_Der
.DialogTitle = "Archivo de Entrada"
.Filter = "(.*)|*.*"
.ShowOpen
End With
File_Der_Lectura.Text = Dialogo_Der.FileName
End Sub


---


Private Sub Buscar_izq_Click()
With Dialogo_Izq
.DialogTitle = "Archivo de Entrada"
.Filter = "(.*)|*.*"
.ShowOpen
End With
File_Izq_Lectura.Text = Dialogo_Izq.FileName
End Sub


---


Public Sub CommandButton3_Click()
w = focal.Value
' Crea el marco para la Foto Izquierda segun los datos de la pantalla

FOTO_IZQ_VERT(0).X = Toma_Izq_x.Value - Ancho_Izq.Value / 2
FOTO_IZQ_VERT(0).Y = Toma_Izq_y.Value + w ' focal.Value
FOTO_IZQ_VERT(0).Z = Toma_Izq_z.Value - Alto_Izq.Value / 2

FOTO_IZQ_VERT(1).X = Toma_Izq_x.Value + Ancho_Izq.Value / 2
FOTO_IZQ_VERT(1).Y = Toma_Izq_y.Value + w ' focal.Value
FOTO_IZQ_VERT(1).Z = Toma_Izq_z.Value - Alto_Izq.Value / 2

FOTO_IZQ_VERT(2).X = Toma_Izq_x.Value + Ancho_Izq.Value / 2
FOTO_IZQ_VERT(2).Y = Toma_Izq_y.Value + w ' focal.Value
FOTO_IZQ_VERT(2).Z = Toma_Izq_z.Value + Alto_Izq.Value / 2

FOTO_IZQ_VERT(3).X = Toma_Izq_x.Value - Ancho_Izq.Value / 2
FOTO_IZQ_VERT(3).Y = Toma_Izq_y.Value + w ' focal.Value
FOTO_IZQ_VERT(3).Z = Toma_Izq_z.Value + Alto_Izq.Value / 2
' Crea el marco para la Foto Derecha segun los datos de la pantalla
FOTO_DER_VERT(0).X = Toma_Der_x.Value - Ancho_Der.Value / 2
FOTO_DER_VERT(0).Y = Toma_Izq_y.Value + w ' focal.Value
FOTO_DER_VERT(0).Z = Toma_Der_z.Value - Alto_Der.Value / 2

FOTO_DER_VERT(1).X = Toma_Der_x.Value + Ancho_Der.Value / 2
FOTO_DER_VERT(1).Y = Toma_Izq_y.Value + w ' focal.Value
FOTO_DER_VERT(1).Z = Toma_Der_z.Value - Alto_Der.Value / 2

FOTO_DER_VERT(2).X = Toma_Der_x.Value + Ancho_Der.Value / 2
FOTO_DER_VERT(2).Y = Toma_Izq_y.Value + w ' focal.Value
FOTO_DER_VERT(2).Z = Toma_Der_z.Value + Alto_Der.Value / 2

FOTO_DER_VERT(3).X = Toma_Der_x.Value - Ancho_Der.Value / 2
FOTO_DER_VERT(3).Y = Toma_Izq_y.Value + w ' focal.Value
FOTO_DER_VERT(3).Z = Toma_Der_z.Value + Alto_Der.Value / 2

Set FOTO_IZQ = CreateShapeElement1(Nothing, FOTO_IZQ_VERT, -1)
Set FOTO_DER = CreateShapeElement1(Nothing, FOTO_DER_VERT, -1)

Set FOTO_IZQ.Level = ActiveDesignFile.Levels.FindByCode(2)
Set FOTO_DER.Level = ActiveDesignFile.Levels.FindByCode(1)

FOTO_IZQ.Color = 1
FOTO_DER.Color = 3

ActiveModelReference.AddElement FOTO_IZQ
ActiveModelReference.AddElement FOTO_DER

FOTO_IZQ.Redraw
FOTO_DER.Redraw

Menu.Show vbModeless
Datos_fotos.Hide

End Sub


---


Private Sub CommandButton4_Click()
Comienzo.Show vbModeless
Datos_fotos.Hide
End Sub

```

Código 2. Inserción de imágenes al ambiente de Microstation®.
(Elaboración Propia)

➤ Menú:

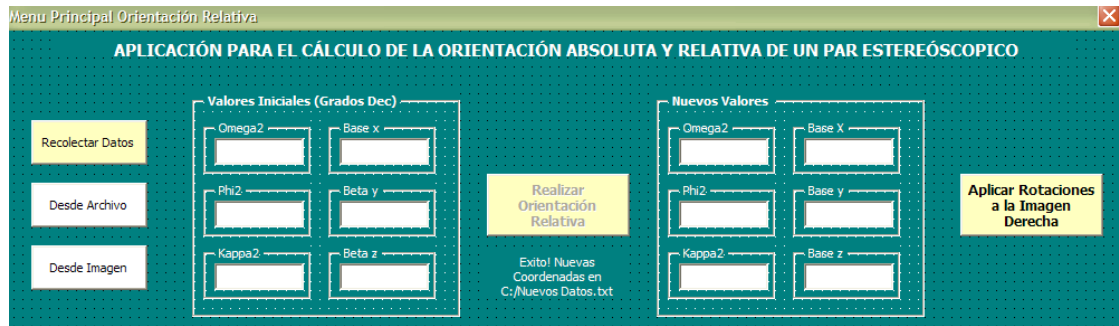


Figura 53. Formulario del Menú Principal del Programa
(Elaboración Propia)

En este Formulario existen diversos botones y cuadros de valores, que poseen cada uno un código, los cuáles se mostrarán a continuación por separado, en el orden de izquierda a derecha, que es el orden en el que se lleva a cabo el programa:

En esta parte del código se colocarán las declaraciones de variables del formulario y los primeros tres botones que aparecen a mano izquierda:

```
Dim ResultoAnt(1 To 5, 1 To 1) As Double
Public omega2 As Double
Public phi2 As Double
Public kappa2 As Double
Public bx As Double
Public by As Double
Public bz As Double
Public PIrad As Double

Private Sub CommandButton1_Click() ' Función del Botón para Recolectar Datos
    CommandButton4.Visible = True
    CommandButton5.Visible = True
End Sub

Private Sub CommandButton4_Click() ' Botón para Recolectar Datos desde Archivo
    Ventana1.Show vbModeless
    Menu.Hide
End Sub

Private Sub CommandButton5_Click() ' Botón para Recolectar Datos desde Imagen
    Ventana3.Show vbModeless
    Menu.Hide
End Sub
```

Código 3. Declaración de Variables del Formulario del Menú Principal.
(Elaboración Propia)

Los botones son para elegir de qué manera se obtendrán las coordenadas de la imagen, se presentan dos opciones: un botón para utilizar las coordenadas que se encuentren previamente en un archivo de

datos y el otro botón para adquirir las coordenadas marcando puntos sobre imágenes que hayan sido cargadas a la aplicación Microstation® previamente.

Ahora se colocará el código de la segunda parte del Menú principal, que se corresponde con la Introducción de los Valores Iniciales por el usuario, en esta parte se les asigna una variable a cada valor y se inicializan dentro del Formulario en cero (0), ya que se ilustrará la inicialización de los valores iniciales se incluirá también la inicialización de todo el formulario:

```
Private Sub UserForm_Activate()  
  
CommandButton4.Visible = False  
CommandButton5.Visible = False  
Respuesta.Visible = False  
  
' El usuario introduce los valores de omega2, phi2 y kappa2  
  
omega2 = 0           ' Inicialización de Valores Iniciales en cero  
phi2 = 0  
kappa2 = 0  
by = 0  
bz = 0  
  
w2.Value = omega2   ' Asignacion de variables a la matriz de rotacion  
p2.Value = phi2  
k2.Value = kappa2  
baseY.Value = by  
baseZ.Value = bz  
  
End Sub
```

*Código 4. Inicialización de variables del Formulario del Menú Principal.
(Elaboración Propia)*

El código de la tercera parte del Menú consiste en la elaboración de las iteraciones que corresponden con la realización de la Orientación Relativa, aquí son tomados los Valores Iniciales introducidos previamente y la Matriz Datos introducida al inicio, la manera en que ésta es adquirida se explicará más adelante.

```

Private Sub RelativeOrientation_Click()

itera = 0

PIrad = 3.14159265358979

omega2 = (Menu.w2.Value) * (PIrad / 180)
phi2 = (Menu.p2.Value) * (PIrad / 180)
kappa2 = (Menu.k2.Value) * (PIrad / 180)
by = Menu.baseY.Value * (PIrad / 180)
bz = Menu.baseZ.Value * (PIrad / 180)

Do While (((Abs(ResultoAnt(1, 1) - Resulto(1, 1)) > 0.0005) And (Abs(ResultoAnt(2, 1) - Resulto(2, 1)) > 0.0005)
And (Abs(ResultoAnt(3, 1) - Resulto(3, 1)) > 0.0005) And (Abs(ResultoAnt(4, 1) - Resulto(4, 1)) > 0.0005)
And (Abs(ResultoAnt(5, 1) - Resulto(5, 1)) > 0.0005))) Or (itera < 50))

For j = 1 To 5
    ResultoAnt(j, 1) = Resulto(j, 1)
Next j

Resultado
Nuevos_Valores
Rotation
Datos_corregidos
Matriz_A_B_X
Transpuesta_B
Bt_X_B
Bt_X_X
Determinante_BtxB
MatrizCofactores_BtxB
Matriz_Adjunta
Matriz_Inversa

itera = itera + 1

Loop

Respuesta.Visible = True

End Sub

```

*Código 5. Iteraciones realizadas durante la Orientación Relativa.
(Elaboración Propia)*

La cuarta parte del formulario de Menú corresponde a la impresión en pantalla de los nuevos valores iniciales obtenidos luego de las iteraciones, los cuáles son necesarios para llevar a cabo las rotaciones sobre la imagen derecha, pero el código de éste no se encuentra contenido en el mismo código del Menú, sino en el Módulo denominado “RelOr”, por lo que será colocado más adelante, esto ocurre así porque el procedimiento para realizar el cálculo de los nuevos valores no está incluido en esta parte, sino en ese módulo.

La quinta y última parte corresponde a un botón para elaborar la rotación de la imagen derecha según los valores de ω , ϕ , κ , b_y y b_z resultantes de las iteraciones obtenidas en el proceso de orientación relativa. Con este proceso llevado a cabo, es posible observar las imágenes con el estereoscopio de espejos tridimensionalmente, por lo que el objetivo planteado es obtenido con éxito. Esta parte del código se corresponde con la implementación de la herramienta al programa Microstation®.

```

Private Sub CommandButton6_Click()

Dim FOTO_DER_CENTER As Point3d

FOTO_DER_CENTER.X = Datos_fotos.Toma_Der_x.Value
FOTO_DER_CENTER.Y = Datos_fotos.Toma_Der_y.Value
FOTO_DER_CENTER.Z = Datos_fotos.Toma_Der_z.Value

ActiveModelReference.SelectElement FOTO_IZQ

FOTO_DER.Rotate FOTO_DER_CENTER, (Menu.omega.Text) * (Pi / 180), (Menu.phi.Text)
* (Pi / 180), (Menu.kappa.Text) * (Pi / 180)

FOTO_DER.Rewrite
FOTO_DER.Redraw

ActiveModelReference.UnselectAllElements

CadInputQueue.SendCommand "UPDATE ALL"

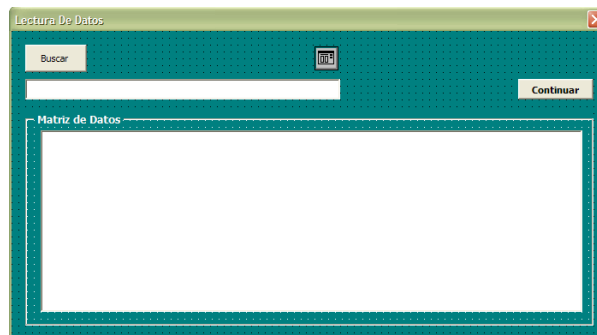
End Sub

```

*Código 6. Aplicación de las Rotaciones a la Imagen Derecha.
(Elaboración Propia)*

Estas cinco partes integran el código del Menú Principal. Como se explicó anteriormente, al inicio de este formulario se presentan las opciones para recolectar datos, a continuación se explicarán los cuadros de diálogo que surgen de elegir una u otra opción (*Ventana 1 y Ventana 3*):

- Ventana 1. La ventana uno proviene de seleccionar en el formulario de Menú el botón para recolectar datos desde un archivo:



*Figura 54. Formulario para Recolectar Puntos desde un Archivo.
(Elaboración Propia)*

El código que corresponde a este procedimiento es el siguiente:

```

Private Sub BotonContinuar_Click()
Menu.Show vbModeless
Ventana1.Hide
End Sub

Private Sub Buscar_Click()      ' Busqueda del Archivo de la Matriz Datos
With Dialogo
.DialogTitle = "Archivo de Entrada"
.Filter = "(.*)|*.*"
.ShowOpen
End With

File_Lectura.Text = Dialogo.FileName

Open File_Lectura.Text For Input As #1      ' Almacenar y Mostrar la Matriz de Datos en Pantalla
cont = 0
Do While Not EOF(1)
cont = cont + 1
For j = 1 To 7
Input #1, Datos(cont, j)
Next j
ListBox1.ColumnCount = 7
ListBox1.List = Datos()

Loop
Close #1

Ventana1.Height = 294
Ventana1.Width = 526.5
ListBox1.Visible = True
BotonContinuar.Visible = True
Frame1.Visible = True

End Sub

Private Sub UserForm_Activate()

ListBox1.Visible = False
BotonContinuar.Visible = False
Frame1.Visible = False
Ventana1.Height = 92.25
Ventana1.Width = 309
End Sub

```

*Código 7. Adquisición de Matriz de Datos desde un archivo y almacenarla.
(Elaboración Propia)*

Mediante este código desarrollado es posible adquirir un archivo de texto donde estén contenidos las coordenadas imagen, y almacenar esos valores en una matriz denominada Matriz Datos, para ser mostrada en pantalla, una vez que se hallan cargados todos los valores.

El último formulario desarrollado es el siguiente:

- Ventana 3: La ventana tres proviene de seleccionar en el formulario de Menú el botón para recolectar datos desde una imagen:

The screenshot shows a window titled "Captura de Puntos" with a green border and a close button in the top right corner. The window has a dark green background with a white grid pattern. At the top, there is a white instruction box: "Presionar el botón rojo y Seleccionar primero el punto en la Imagen Izquierda, luego en la Imagen Derecha y Guardar cada uno." To the right of this box is a "Atrás" button. Below the instruction is a red button labeled "Capturar Puntos" and a white input field labeled "Punto". Underneath is a white box labeled "COORDENADAS EN LA IMAGEN IZQUIERDA" containing three input fields labeled "X1", "Y1", and "Z1". To the right of these fields is a "Guardar" button. Below that is another white box labeled "COORDENADAS EN LA IMAGEN DERECHA" containing three input fields labeled "X2", "Y2", and "Z2". At the bottom right is an "Aceptar" button.

Figura 55. Formulario para la Captura de Puntos desde la Imagen.
(Elaboración Propia)

El código de este formulario permite que aparezcan los valores de las coordenadas que se marquen en la imagen, que se almacenen esos valores en la Matriz Datos y que se identifique sobre la imagen el Número del Punto seleccionado. El código que surge en este apartado se mostrará dividido en dos partes: la primera será el procedimiento para adquirir las coordenadas imagen y la segunda para almacenar la Matriz Datos.

```

Private Sub CommandButton1_Click() ' Captura de puntos en ambas imágenes, para obtener las coordenadas de c/u

Dim startPoint As Point3d
Dim point As Point3d, point2 As Point3d
Dim userPnt As CadInputMessage

' Start a command ' En la Imagen Izquierda
CadInputQueue.SendCommand "PLACE POINT "

Set userPnt = CadInputQueue.GetInput(msdCadInputTypeDataPoint)

' Coordinates are in master units
startPoint.X = userPnt.point.X
startPoint.Y = userPnt.point.Y
startPoint.Z = userPnt.point.Z

' Send a data point to the current command
point.X = startPoint.X
point.Y = startPoint.Y
point.Z = startPoint.Z

coord_X1.Text = startPoint.X
coord_Y1.Text = startPoint.Y
coord_Z1.Text = startPoint.Z

CadInputQueue.SendDataPoint point, 2

' Start a command (segundo punto) ' En la Imagen Derecha
CadInputQueue.SendCommand "PLACE POINT "

Set userPnt = CadInputQueue.GetInput(msdCadInputTypeDataPoint)

' Coordinates are in master units
startPoint.X = userPnt.point.X
startPoint.Y = userPnt.point.Y
startPoint.Z = userPnt.point.Z

' Send a data point to the current command
point.X = startPoint.X
point.Y = startPoint.Y
point.Z = startPoint.Z

coord_X2.Text = startPoint.X
coord_Y2.Text = startPoint.Y
coord_Z2.Text = startPoint.Z

CadInputQueue.SendDataPoint point, 2

'Send a reset to the current command
CadInputQueue.SendReset

'CommandState.StartDefaultCommand

End Sub

```

*Código 8. Captura de Puntos desde las Imágenes cargadas en Microstation.
(Elaboración Propia)*

Este código contiene comandos que permite la interacción de la aplicación con Microstation®, para poder obtener con la aplicación las coordenadas imagen que están contenidas en el programa.

Ahora bien, una vez adquiridas las coordenadas de cada punto, la aplicación almacena cada una de estas mediante las siguientes rutinas:

```

Private Sub CommandButton3_Click() ' Guardar la Matriz Datos en un archivo de texto

Open "c:/Datos.txt" For Output As #1
For i = 1 To cont
For j = 1 To 7

Print #1, Datos(i, j)

Next j
Next i

Close #1

Menu.Show vbModeless
Ventana3.Hide

End Sub

Private Sub Save_Click() ' Guardar las coordenadas de cada punto en la matriz Datos de ambas imágenes

cont = cont + 1

Datos(cont, 1) = NumPto.Value
Datos(cont, 2) = coord_X1.Text
Datos(cont, 3) = coord_Y1.Text
Datos(cont, 4) = coord_Z1.Text
Datos(cont, 5) = coord_X2.Text
Datos(cont, 6) = coord_Y2.Text
Datos(cont, 7) = coord_Z2.Text

NumPto.Value = NumPto.Value + 1
coord_X1.Text = 0
coord_Y1.Text = 0
coord_Z1.Text = 0
coord_X2.Text = 0
coord_Y2.Text = 0
coord_Z2.Text = 0

End Sub

```

*Código 9. Almacenar la Matriz Datos en la Aplicación y en un archivo de datos.
(Elaboración Propia)*

Con este código se concluye el desarrollo de códigos de los formularios. Ahora bien, como se describió anteriormente en la Identificación de Fórmulas y el Desarrollo en Excel, para resolver la Orientación Relativa se debe solucionar mediante el método de Mínimos Cuadrados un sistema de ecuaciones. La resolución de este sistema se elaboró mediante subrutinas basadas tanto en el desarrollo Excel como en el Diagrama de Programación, que se encuentran contenidas en los diversos Módulos de VBA, las cuáles son llamadas como se observó anteriormente en el Menú Principal, botón para Realizar la Orientación Relativa. Cada uno de los códigos de esos módulos se ilustra a continuación:

- Módulo1_ Inicio: Este módulo es simplemente para indicar en qué Formulario debe comenzar la aplicación:

```

Sub Inicio()

Comienzo.Show vbModeless

End Sub

```

*Código 10. Inicio de la Aplicación
(Elaboración Propia)*

- **Módulo2_MRotación:** Se programó el código para elaborar la matriz de rotación, aquí se necesitan los Valores Iniciales introducidos por el usuario al inicio para poder calcular la primera matriz, luego los valores cambian según sean los obtenidos en cada iteración.

```

Public MatrizR(1 To 3, 1 To 3) As Double
Public Pirad As Single
Public omega2 As Double
Public phi2 As Double
Public kappa2 As Double
Public bx As Double
Public by As Double
Public bz As Double

Sub Rotation()           ' Subrutina de la Matriz de Rotacion

MatrizR(1, 1) = Cos(phi2) * Cos(kappa2)
MatrizR(1, 2) = -Cos(phi2) * Sin(kappa2)
MatrizR(1, 3) = Sin(phi2)
MatrizR(2, 1) = Cos(omega2) * Sin(kappa2) + Sin(omega2) * Sin(phi2) * Cos(kappa2)
MatrizR(2, 2) = Cos(omega2) * Cos(kappa2) - Sin(omega2) * Sin(phi2) * Sin(kappa2)
MatrizR(2, 3) = -Sin(omega2) * Cos(phi2)
MatrizR(3, 1) = Sin(omega2) * Sin(kappa2) - Cos(omega2) * Sin(phi2) * Cos(kappa2)
MatrizR(3, 2) = Sin(omega2) * Cos(kappa2) + Cos(omega2) * Sin(phi2) * Sin(kappa2)
MatrizR(3, 3) = Cos(omega2) * Cos(phi2)

End Sub

```

*Código 11. Cálculo de la Matriz de Rotación.
(Elaboración Propia)*

- Módulo3_M_A_B_D: Cálculo de las matrices A, B y Delta, necesarias para poder formar el sistema de ecuaciones indirectas. Son necesarios los valores de la Matriz de Rotación y de la Matriz Datos.

```

Public Datos(1 To 100, 1 To 7) As Double
Public Datosc(1 To 100, 1 To 7) As Double
Dim i As Single
Dim cont2 As Single
Public cont As Single
Public MatrizA(1 To 50, 1 To 6) As Double
Public MatrizB(1 To 50, 1 To 5) As Double
Public MatrizX(1 To 50, 1 To 1) As Double
Sub Matriz_A_B_X()
    ' Calculo de las Matrices de coeficientes A, B y X
For cont2 = 1 To cont
    ' Calculo de la Matriz A
    MatrizA(cont2, 1) = (Datos(cont2, 5) * (Sin(omega2) * Cos(phi2) * Cos(kappa2))) + (Datos(cont2, 6) *
        (-Sin(omega2) * Cos(phi2) * Sin(kappa2))) + (Datos(cont2, 7) * (Sin(omega2) * Sin(phi2)))
    MatrizA(cont2, 2) = (Datos(cont2, 5) * (-Cos(omega2) * Cos(phi2) * Cos(kappa2))) + (Datos(cont2, 6) *
        (Cos(omega2) * Cos(phi2) * Sin(kappa2))) + (Datos(cont2, 7) * (-Cos(omega2) * Sin(phi2)))
    MatrizA(cont2, 3) = (Datos(cont2, 5) * (-Sin(phi2) * Cos(kappa2))) + (Datos(cont2, 6) * (Sin(phi2) *
        Sin(kappa2))) + (Datos(cont2, 7) * (Cos(phi2)))
    MatrizA(cont2, 4) = (MatrizR(2, 2) * Datos(cont2, 5)) - (MatrizR(2, 1) * Datos(cont2, 6))
    MatrizA(cont2, 5) = (MatrizR(3, 2) * Datos(cont2, 5)) - (MatrizR(3, 1) * Datos(cont2, 6))
    MatrizA(cont2, 6) = (MatrizR(1, 2) * Datos(cont2, 5)) - (MatrizR(1, 1) * Datos(cont2, 6))

    ' Calculo de la Matriz B
    MatrizB(cont2, 1) = (Datos(cont2, 5) * Datos(cont2, 4)) - (Datos(cont2, 2) * Datos(cont2, 7))
    MatrizB(cont2, 2) = (Datos(cont2, 2) * Datos(cont2, 6)) - (Datos(cont2, 5) * Datos(cont2, 3))
    MatrizB(cont2, 3) = ((Datos(cont2, 7) * Datos(cont2, 4)) + (Datos(cont2, 6) * Datos(cont2, 3))) +
        (by * (-Datos(cont2, 6) * Datos(cont2, 2))) + (bz * (-Datos(cont2, 7) * Datos(cont2, 2)))
    MatrizB(cont2, 4) = ((-Datos(cont2, 4) * MatrizA(cont2, 1)) + (Datos(cont2, 3) * MatrizA(cont2, 2))) +
        (by * ((Datos(cont2, 4) * MatrizA(cont2, 3)) - (Datos(cont2, 2) * MatrizA(cont2, 2)))) +
        (bz * ((-Datos(cont2, 3) * MatrizA(cont2, 3)) + (Datos(cont2, 2) * MatrizA(cont2, 1))))
    MatrizB(cont2, 5) = ((Datos(cont2, 3) * MatrizA(cont2, 5)) - (Datos(cont2, 4) * MatrizA(cont2, 4))) +
        (by * ((Datos(cont2, 4) * MatrizA(cont2, 6)) - (Datos(cont2, 2) * MatrizA(cont2, 5)))) +
        (bz * ((Datos(cont2, 2) * MatrizA(cont2, 4)) - (Datos(cont2, 3) * MatrizA(cont2, 6))))

    'Calculo de la Matriz X
    MatrizX(cont2, 1) = -(Datos(cont2, 3) * Datos(cont2, 7) - Datos(cont2, 6) * Datos(cont2, 4)) - (by * (Datos(cont2, 4) *
        Datos(cont2, 5) - Datos(cont2, 2) * Datos(cont2, 7))) - (bz * (Datos(cont2, 2) * Datos(cont2, 6) -
        Datos(cont2, 3) * Datos(cont2, 5)))
Next cont2
End Sub

```

Código 12. Cálculo de las Matrices de Coeficientes A, B y Delta(X).
(Elaboración Propia)

A partir de este punto los módulos siguientes forman parte de la resolución del sistema de ecuaciones formado, mediante el método de Ajuste por Mínimos Cuadrados, los procedimientos dentro de cada módulo están organizados en el orden en que deben ser ejecutados para obtener resultados satisfactorios.

- Módulo4_Bt: Realiza el cálculo de la matriz transpuesta de B.

```

Dim cont3 As Single
Public Bt(1 To 5, 1 To 100) As Double
Dim i As Single

Sub Transpuesta_B() ' Calculo de la transpuesta de B

For cont3 = 1 To cont
    For i = 1 To 5
        Bt(i, cont3) = MatrizB(cont3, i)
    Next i
Next cont3

End Sub

```

*Código 13. Cálculo de la Matriz transpuesta B.
(Elaboración Propia)*

- Módulo5_Bt_x_B_D: Multiplicaciones de la matriz transpuesta de B por la matriz B y la matriz Delta.

```

Dim i As Single
Dim j As Single
Dim k As Single
Public BtxB(1 To 5, 1 To 5) As Double
Public BtxX(1 To 5, 1 To 1) As Double

Sub Bt_x_B() ' Calculo de la matriz B transpuesta por B

For i = 1 To 5
    For j = 1 To 5
        BtxB(i, j) = 0
    Next j
Next i

For i = 1 To 5
    For j = 1 To 5
        For k = 1 To cont
            BtxB(i, j) = BtxB(i, j) + Bt(i, k) * MatrizB(k, j)
        Next k
    Next j
Next i

End Sub

Sub Bt_x_X() ' Calculo de la matriz B transpuesta por X

For i = 1 To 5
    For j = 1 To 1
        BtxX(i, j) = 0
    Next j
Next i

For i = 1 To 5
    For j = 1 To 1
        For k = 1 To cont
            BtxX(i, j) = (BtxX(i, j) + Bt(i, k) * MatrizX(k, j))
        Next k
    Next j
Next i

End Sub

```

*Código 14. Cálculo de la Matriz B transpuesta multiplicada por B y por Delta (X).
(Elaboración Propia)*

- Módulo6_Inversa: Cálculo de la Matriz inversa formada por la multiplicación de la transpuesta de B por ella misma. El código será mostrado en tres partes, una en donde se encuentra la declaración de variables, la segunda el cálculo del determinante y la tercera parte donde se encuentran las rutinas para hallar la matriz inversa.

```
Dim i As Single
Dim j As Single
Public M(1 To 4, 1 To 4) As Double
Public N(1 To 4, 1 To 4) As Double
Public P(1 To 5, 1 To 5) As Single
Public Deter(1 To 5) As Double
Public DET_DEF As Double
Public DETERMINANTE(1 To 25) As Double
Public Cof(1 To 5, 1 To 5) As Double
Public Adj(1 To 5, 1 To 5) As Double
Public Inv(1 To 5, 1 To 5) As Double
```

Código 15. Declaración de variables del módulo para calcular la matriz inversa (Elaboración Propia)

```
Function Determinante_BtXB() ' Calculo del Determinante de la Matriz Bt x B de 5x5
    DET_DEF = 0
    For i = 1 To 5
        Deter(i) = 0
        DETERMINANTE(i) = 0
    Next i
    P(1, 1) = 2
    P(1, 2) = 3
    P(1, 3) = 4
    P(1, 4) = 5
    P(2, 1) = 1
    P(2, 2) = 3
    P(2, 3) = 4
    P(2, 4) = 5
    P(3, 1) = 1
    P(3, 2) = 2
    P(3, 3) = 4
    P(3, 4) = 5
    P(4, 1) = 1
    P(4, 2) = 2
    P(4, 3) = 3
    P(4, 4) = 5
    P(5, 1) = 1
    P(5, 2) = 2
    P(5, 3) = 3
    P(5, 4) = 4

    For k = 1 To 5
        For i = 1 To 4
            For j = 1 To 4
                M(i, j) = BtXB(i + 1, P(k, j))
            Next j
        Next i
        Deter(k) = M(1, 1) * M(2, 2) * M(3, 3) * M(4, 4) - M(1, 1) * M(2, 2) * M(4, 3) * M(3, 4) - M(1, 1) * M(3, 2) * M(2, 3)
    Next k

    For i = 1 To 5
        DET_DEF = BtXB(1, i) * (-1) ^ (1 + i) * Deter(i) + DET_DEF
    Next i
End Function
```

Código 16. Cálculo del Determinante de la Matriz Bt x B para calcular la matriz inversa (Elaboración Propia)

```

Sub MatrizCofactores_BtXB() ' Calculo de la Matriz de Cofactores de Bt x B para hallar la inversa
For l = 1 To 5
  For k = 1 To 5
    For i = 1 To 4
      For j = 1 To 4
        N(i, j) = BtXB(P(l, i), P(k, j))
      Next j
    Next i
    DETERMINANTE(k) = N(1, 1) * N(2, 2) * N(3, 3) * N(4, 4) - N(1, 1) * N(2, 2) * N(4, 3) * N(3, 4) - N(1, 1) * N(3, 2)
    Cof(l, k) = ((-1) ^ (1 + k)) * DETERMINANTE(k)
  Next k
Next l
End Sub

Sub Matriz_Adjunta() ' Calculo de la Matriz de la Adjunta de Bt x B para hallar la inversa
For j = 1 To 5
  For i = 1 To 5
    Adj(i, j) = Cof(j, i)
  Next i
Next j
End Sub

Sub Matriz_Inversa() ' Calculo de la Inversa de Bt x B
For j = 1 To 5
  For i = 1 To 5
    Inv(i, j) = (Adj(i, j)) / DET_DEF
  Next i
Next j
End Sub

```

*Código 17. Cálculo de la matriz inversa Bt x B.
(Elaboración Propia)*

- **Módulo7_RelOr:** En este módulo se incluyen los procedimientos finales, en primer lugar se calcula la multiplicación de la matriz inversa por la matriz obtenida de la multiplicación de la transpuesta de B por Delta, para obtener los valores diferenciales de las rotaciones y las bases; luego esos diferenciales son sumados a los valores iniciales, obteniendo así unos nuevos valores, que serán utilizados para calcular una nueva Matriz de Rotación (Módulo2) y Matriz de Datos (en este mismo módulo). Aquí es almacenada la Matriz Datos nueva así como los Nuevos Valores Iniciales, estos últimos son impresos en la pantalla del Menú Principal para que puedan ser aplicados sus valores de rotación a la imagen derecha. Primero se colocará el código para calcular los diferenciales y los nuevos valores y luego el calculo de la Nueva Matriz Datos.

```

Dim i As Single
Dim j As Single
Dim k As Single
Dim a As Double
Dim b As Double
Dim c As Double
Public Resulto(1 To 5, 1 To 1) As Double
Public ite As Single
Public Aproximacion(99, 3) As Double
Public itera As Single

Sub Resultado()      ' Calculo de los delta de omega, phi y kappa

For i = 1 To 5
    Resulto(i, 1) = 0
Next i

For i = 1 To 5
    For k = 1 To 5
        Resulto(i, 1) = Resulto(i, 1) + Inv(i, k) * BtxX(k, 1)
    Next k
Next i

End Sub

Sub Nuevos_Valores()      ' Calculo de los nuevos valores de omega, phi y kappa (una vez sumados los delta)

by = by + Resulto(1, 1)
bz = bz + Resulto(2, 1)
omega2 = omega2 + Resulto(3, 1)
phi2 = phi2 + Resulto(4, 1)
kappa2 = kappa2 + Resulto(5, 1)

Menu.omega.Text = omega2
Menu.phi.Text = phi2
Menu.kappa.Text = kappa2
Menu.betay.Text = by
Menu.betaz.Text = bz

End Sub

```

**Código 18. Cálculo de Nuevos Valores Iniciales
(Elaboración Propia)**

```

Sub Datos_corregidos()      ' Nueva Matriz de Datos con los nuevos valores de omega, phi y kappa

For i = 1 To cont
    For j = 1 To 4
        Datosc(i, j) = Datos(i, j)
    Next j
Next i

j = 5
For i = 1 To cont
    Datosc(i, j) = Datos(i, j) * MatrizR(j - 4, 1) + Datos(i, j + 1) * MatrizR(j - 4, 2) + Datos(i, j + 2) * MatrizR(j - 4, 3)
Next i

j = 6
For i = 1 To cont
    Datosc(i, j) = Datos(i, j - 1) * MatrizR(j - 4, 1) + Datos(i, j) * MatrizR(j - 4, 2) + Datos(i, j + 1) * MatrizR(j - 4, 3)
Next i

j = 7
For i = 1 To cont
    Datosc(i, j) = Datos(i, j - 2) * MatrizR(j - 4, 1) + Datos(i, j - 1) * MatrizR(j - 4, 2) + Datos(i, j) * MatrizR(j - 4, 3)
Next i

For i = 1 To cont
    For j = 1 To 7
        Datos(i, j) = Datosc(i, j)
    Next j
Next i

```

**Código 19. Cálculo de la Matriz Datos Nueva.
(Elaboración Propia)**

Con todos estos códigos organizados como se mostró anteriormente, es posible realizar el proceso de Orientación Relativa.

Inicialmente la estructura no había sido esta, todo se había colocado en un mismo Formulario, siendo esto muy desorganizado, por lo que se realizó una investigación más profunda acerca del funcionamiento de VBA, reestructurando así el programa en diversos formularios y módulos donde se encontraran organizados los procedimientos.

Finalmente fue realizada una reestructuración más, en donde se disminuyeron el número de formularios, quedando como resultado el diseño mostrado anteriormente. Con esta estructura de códigos resultó bastante práctico el trabajo, ya que las variables globales fueron declaradas como públicas y cada procedimiento se escribió en módulos diferentes, lo que facilitó la ubicación dentro del desarrollo la aplicación.

4.4.2. Implementación de la Aplicación.

Esta es la fase de finalización de la herramienta, es aquí donde se define si el diseño realizado funciona y es aplicable a cualquier caso. Empleando las fotos adquiridas del Panteón Nacional, se puso a prueba la aplicación, se insertaron las imágenes (utilizando las coordenadas medidas durante el levantamiento topográfico) para hacer las marcaciones de puntos sobre ellas y esas coordenadas se almacenaron en la matriz Datos, que fue empleada para elaborar la orientación relativa; una vez llevada esta a cabo, para saber si los valores de los parámetros (ω , φ , κ , b_y y b_z) finales obtenidos fueron admisibles, se analizaron cada uno de los resultados de las iteraciones, para estudiar la convergencia de los mismos.

A continuación se ilustrará, paso a paso, cómo fue llevada a cabo esta implementación de la aplicación, así como los resultados arrojados por la misma y si son aceptables o no para futuros proyectos.

- Antes de comenzar a utilizar la aplicación se deben crear dos capas o *Levels* y verificar que las unidades de trabajo sean en milímetros. Bajo estas condiciones es posible comenzar con la herramienta.

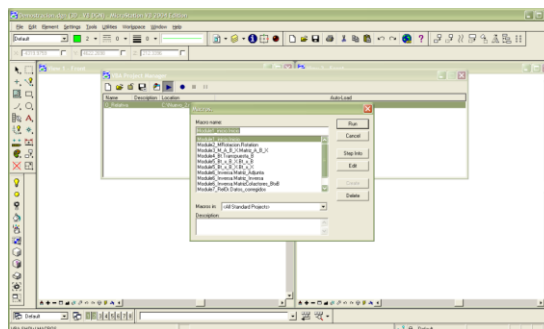


Figura 56. Inicio de la Aplicación.

(Elaboración Propia)

- Una vez iniciada la aplicación se seleccionó la opción para cargar las imágenes del Panteón, empleando las coordenadas del levantamiento topográfico.

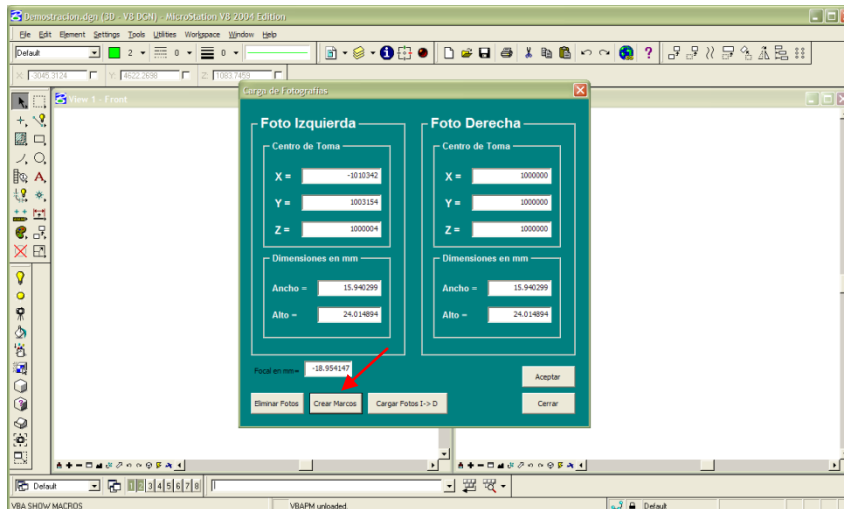


Figura 57. Creación de Marcos o Bloques durante la carga de imágenes.
(Elaboración Propia)

- Una vez creados los marcos, se procedió a insertar las imágenes, la aplicación resalta el marco de la imagen que se debe introducir primero y cuál después. Para evitar errores en esta fase, es importante que al inicio del programa sean generadas las dos capas o *levels* mencionados anteriormente. Luego de oprimir el botón para cargar las imágenes, es posible observar una vista previa de la que se desee insertar.

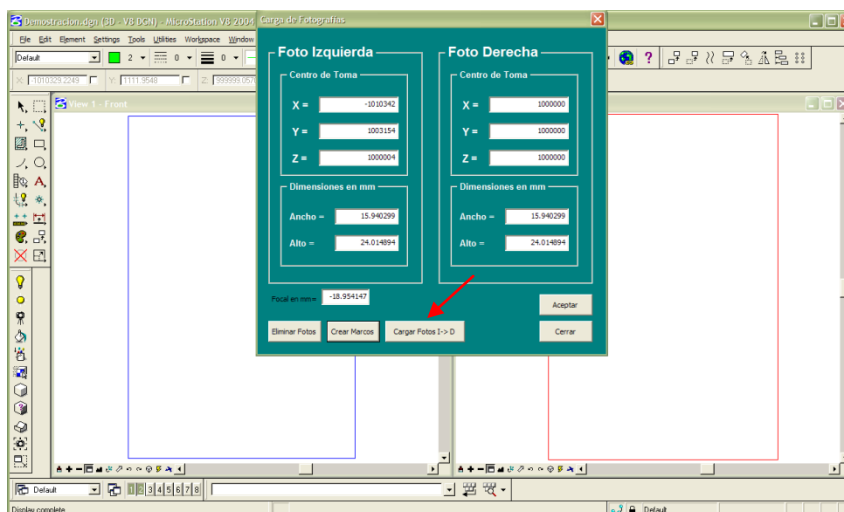


Figura 58. Seleccionar la opción para cargar imágenes, luego de obtener los marcos.
(Elaboración Propia)

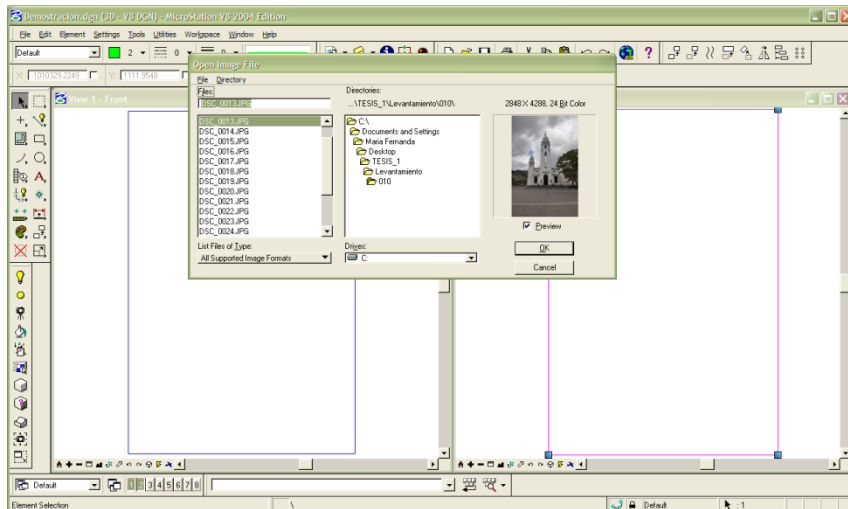


Figura 59. Inserción de la Imagen Derecha.
(Elaboración Propia)

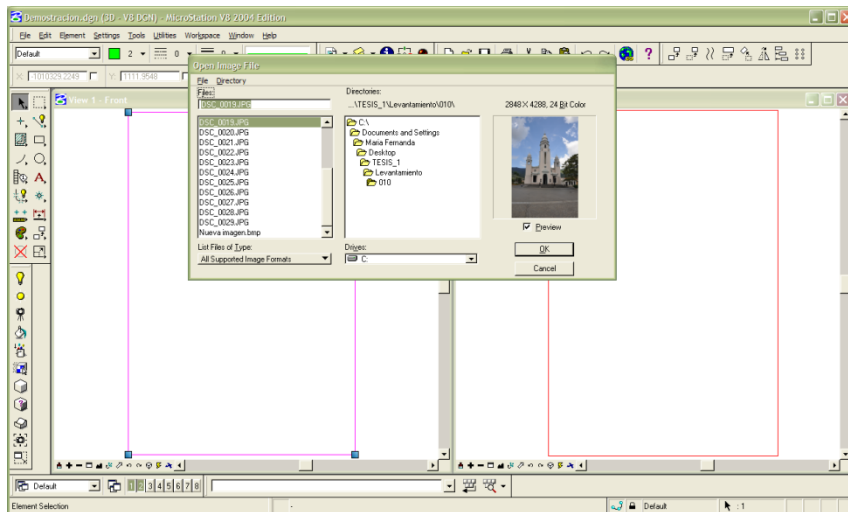


Figura 60. Inserción de la Imagen Izquierda.
(Elaboración Propia)

- Con las imágenes ya cargadas como se observa en la *figura 63*, comienza el proceso de Orientación Relativa, en donde inicialmente se debe elegir la forma de recolectar los datos de coordenadas imagen, que en este caso es mediante la marcación de puntos sobre las mismas, que en este proyecto corresponden a las del Panteón Nacional.

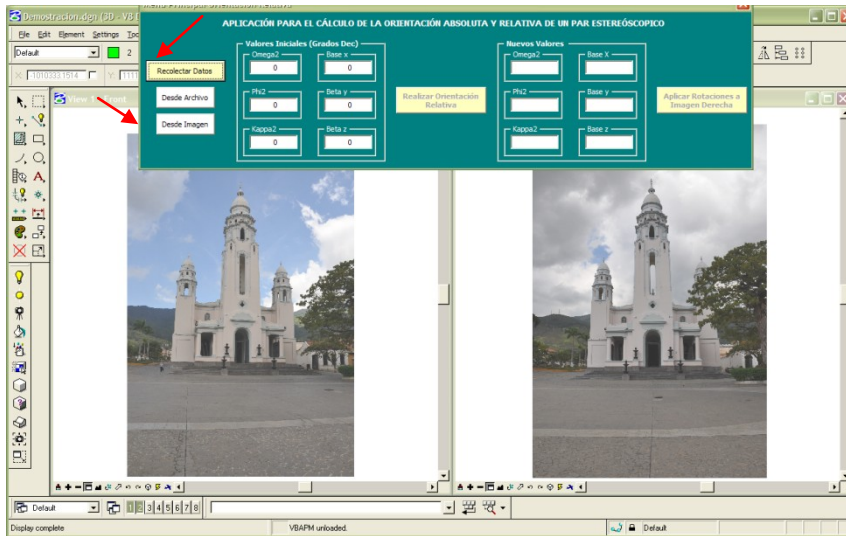


Figura 61. Selección del modo de recolección de datos.
(Elaboración Propia)

- Utilizando la herramienta que se muestra en la figura 64, fue posible aumentar la visión del lugar donde se marcaron los puntos, la identificación de este sitio en ambas fotos se realizó previo a la selección del botón de Captura de Puntos.

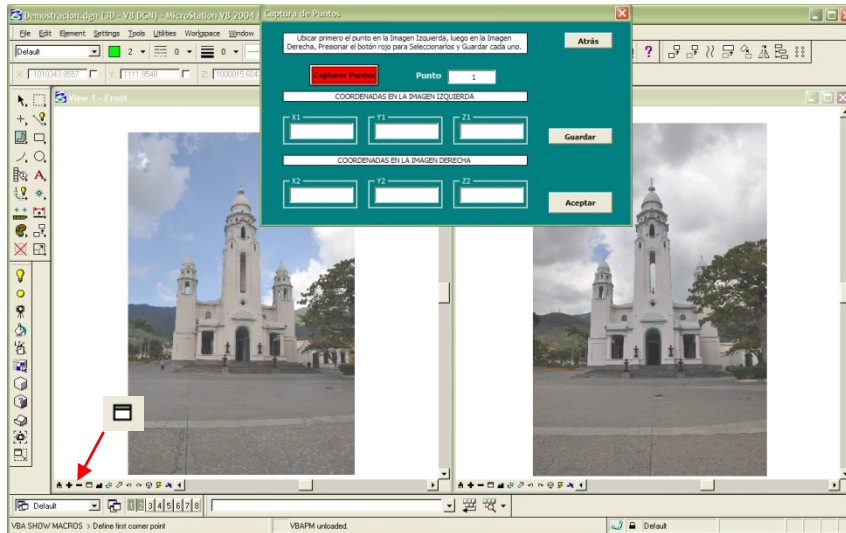


Figura 62. Recolección de Datos a través de puntos sobre las imágenes.
(Elaboración Propia)

- Luego se marcaron y almacenaron cada uno de los puntos, se identificaron un total de ocho puntos en ambas imágenes.



Figura 63. Marcación y almacenaje de puntos ubicados en las imágenes. (Elaboración Propia)

- Estos puntos marcados fueron almacenados en un archivo de texto, denominado Datos, ubicado en la raíz C:/ del computador. Luego en la pantalla del Menú Principal se introdujeron los valores iniciales: que en este caso son: $\omega=\phi=\kappa=0$, $b_y=b_z=0$, $b_x=10\text{ m}=1000000\text{ mm}$.

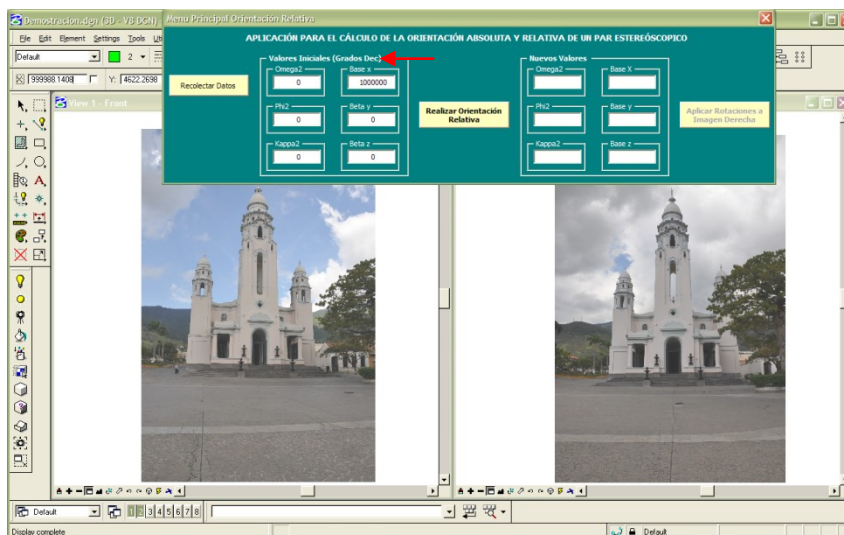


Figura 64. Introducción de Valores Iniciales para la Orientación Relativa. (Elaboración Propia)

- Con los Datos de coordenadas y los valores iniciales se llevó a cabo la Orientación Relativa y los parámetros obtenidos aparecieron en pantalla.

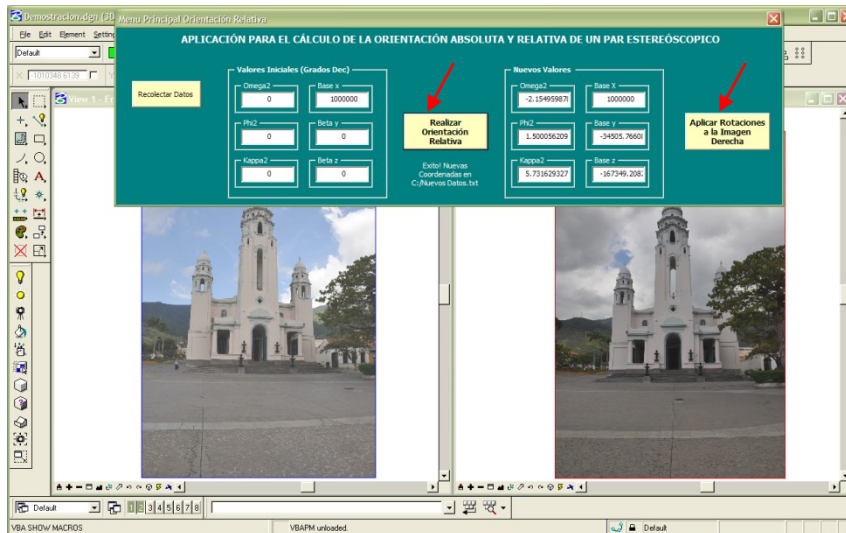


Figura 65. Ejecución de la Orientación Relativa.
(Elaboración Propia)

- Por último, esos parámetros (ω , ϕ , κ , b_x , b_y , b_z) fueron aplicados a la imagen derecha (como el método lo indica), para poder eliminar el paralaje en el eje y, pudiendo observar estereoscópicamente el estereopar adquirido.

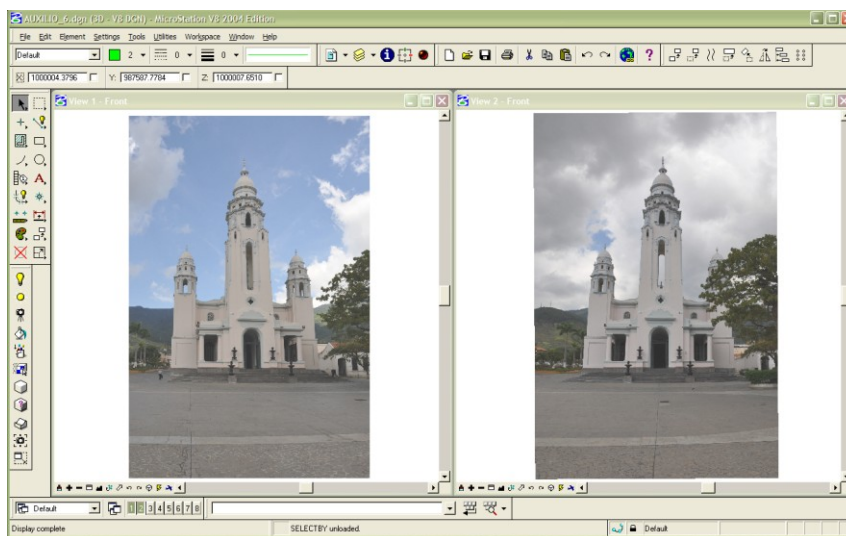


Figura 66. Producto final obtenido luego de rotar la imagen derecha según los valores hallados en la Orientación Relativa.
(Elaboración Propia)

Los resultados obtenidos de la Implementación de la Aplicación se muestran a continuación:

- La Matriz Datos resultante de marcar los ocho puntos en ambas imágenes es la siguiente:

Matriz Datos						
Pto	X1	Y1	Z1	X2	Y2	Z2
1	-4.85077	-3.04588	18.95415	-4.41241	-3.06427	18.95415
2	-1.26537	-2.09516	18.95415	-1.22046	-2.10068	18.95415
3	1.63503	-2.13429	18.95415	1.73567	-2.12876	18.95415
4	-0.14556	-0.52630	18.95415	0.02186	-0.52615	18.95415
5	4.22709	-3.13144	18.95415	4.79816	-3.11448	18.95415
6	-4.14347	1.78739	18.95415	-3.45492	1.75921	18.95415
7	-0.33871	2.86813	18.95415	0.01420	2.86804	18.95415
8	-0.29117	6.29625	18.95415	0.25760	6.28580	18.95415

- Los nuevos resultados obtenidos luego de realizar el proceso de orientación relativa y los valores de Omega, Phi, Kappa, bx y by, y el número de iteraciones realizadas para encontrar estos valores es:

Nueva Matriz Datos						
Punto	X1	Y1	Z1	X2	Y2	Z2
1	-4.851	-3.046	18.954	-4.543	-3.043	18.927
2	-1.265	-2.095	18.954	-1.346	-2.095	18.946
3	1.635	-2.134	18.954	1.61	-2.138	18.964
4	-0.146	-0.526	18.954	-0.096	-0.527	18.954
5	4.227	-3.131	18.954	4.667	-3.139	18.983
6	-4.143	1.787	18.954	-3.561	1.776	18.933
7	-0.339	2.868	18.954	-0.087	2.868	18.954
8	-0.291	6.296	18.954	0.174	6.284	18.956

Nuevos valores (bx= 1000000 mm)

Base y	Base z	Omega2	Phi2	Kappa2	Iteraciones
-0.0088rad	0.0492rad	0.00003rad	-0.00498rad	-0.00483rad	8
-8827.2147 mm	49247.074mm	0.00194°	-0.28507°	-0.27672°	

- Las diferencias calculadas en cada iteración entre los valores de los delta (Δ) de ω , ϕ , κ , betaz z y beta y hallados, corresponde a la precisión de los resultados. Para poder establecer un límite de iteraciones se definió la tolerancia siguiente: la discrepancia entre ese último valor hallado y el contiguo no debe ser mayor a 0.005 rad, que corresponde a 0.286 grados decimales, y en caso de que esto no ocurriera se fijo un máximo de 200 iteraciones. Los resultados de esas diferencias en cada iteración se ilustran a continuación:

Diferencias entre los valores delta obtenidos					
Base y	Base z	Omega2	Phi2	Kappa2	Iteración
0	0	0	0	0	1
0.009	-0.0352	0	0.0077	0.0051	2
-0.0093	0.0216	0.0001	-0.007	-0.005	3
-0.0002	-0.0024	0	-0.0077	-0.0051	4
-0.0003	0.0163	-0.0001	-0.0004	0	5
0.0015	0.0106	-0.0001	0.0054	0.0049	6
0.0001	-0.008	0	0.0072	0.005	7
-0.0005	-0.0022	0.0001	0.0024	0.0002	8

Estos fueron los resultados que se obtuvieron con la implementación de la aplicación en las imágenes del Panteón Nacional, como se puede observar, luego de 8 iteraciones se alcanzaron las precisiones esperadas, esto se debe a que a las imágenes les fueron aplicadas ciertas correcciones empleando los valores de deformaciones del lente, hallados previamente durante la Calibración de la Cámara en Photomodeler.

Fue necesario elaborar estas correcciones, ya que al trabajar con las imágenes tomadas directamente, sin ningún procesamiento, las precisiones esperadas no eran alcanzadas.

Debido a esta situación, se comprueba que la precisión de los resultados que se obtengan con la aplicación, se encuentran estrechamente relacionados con la geometría de las estaciones de toma de las imágenes.

Luego de calcular y aplicar a la imagen derecha los valores de orientación hallados, fue posible realizar marcación de puntos, así como comprobar que es posible elaborar productos cartográficos, empleando las diversas herramientas que posee Microstation, esto es ilustrado posteriormente.

Luego de elaborar la implementación con las imágenes del Panteón se procedió a elaborar los procedimientos de orientación con los datos Ejemplo, utilizados para el desarrollo elaborado en Excel y con los datos de coordenadas de una imagen aérea, para validar el funcionamiento de la aplicación, y demostrar que es aplicable a estereopares aéreos.

En primer lugar se tomaron los datos del ejemplo hallado durante la revisión bibliográfica, utilizado para el desarrollo de los procedimientos en Excel. Los datos de origen y los resultados se muestran a continuación:

- La Matriz Datos que se introdujo a la herramienta es la siguiente:

Matriz de Datos						
1	12.400	-1.113	-100.800	-2.556	-1.128	-100.800
2	22.618	-12.826	-100.800	7.748	-12.903	-100.800
3	-3.255	-18.263	-100.800	-19.009	-18.383	-100.800
4	-3.124	-1.307	-100.800	-18.128	-1.335	-100.800
5	-3.075	16.750	-100.800	-18.170	16.826	-100.800
6	21.507	37.775	-100.800	7.570	38.003	-100.800
7	12.654	52.584	-100.800	0.719	52.904	-100.800
8	-13.299	-13.175	-100.800	-28.278	-13.234	-100.800

- Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

Nueva Matriz Datos						
Punto	X1	Y1	Z1	X2	Y2	Z2
1	12.4	-1.113	-100.8	-2.988	-1.583	-100.782
2	22.618	-12.826	-100.8	7.316	-13.359	-100.773
3	-3.255	-18.263	-100.8	-19.44	-18.838	-100.634
4	-3.124	-1.307	-100.8	-18.559	-1.79	-100.714
5	-3.075	16.75	-100.8	-18.601	16.371	-100.796
6	21.507	37.775	-100.8	7.139	37.547	-101.002
7	12.654	52.584	-100.8	0.288	52.448	-101.04
8	-13.299	-13.175	-100.8	-28.709	-13.689	-100.617
Nuevos Valores (Base x = 800 mm)						
Base y	Base z	Omega2	Phi2	Kappa2	Iteraciones	
0.0158rad	-0.035rad	0.0356rad	-0.0444rad	-0.0797rad	4	
12.64mm	-28.00mm	2.0389°	-2.5440°	-4.5645°		

- Y las precisiones que se lograron con estos datos, es decir las discrepancias entre cada iteración fueron:

Diferencias entre los valores delta obtenidos					
Base y	Base z	Omega2	Phi2	Kappa2	Iteración
0	0	0	0	0	1
-0.0162	0.0355	0.0023	-0.0021	-0.0001	2
0.0165	-0.036	-0.0023	0.0022	0.0001	3
-0.0003	0.0004	-0.0023	0.0021	0	4

Como se puede apreciar, las precisiones en esta situación son muy buenas, obteniendo diferencias por debajo de medio grado decimal (0.13°)

y con tan sólo cuatro iteraciones, fue posible obtener resultados aceptables. Esto permitiría argumentar que la aplicación funcionó de manera exitosa.

Como segunda opción, se marcaron puntos sobre unas imágenes aéreas, cuyas coordenadas se almacenaron en la matriz Datos que se muestra a continuación, utilizada para elaborar la Orientación Relativa y corroborar que, como en el caso anterior, las precisiones fueran las esperadas.

- La Matriz de Datos es:

Pto	X1	Y1	Z1	X2	Y2	Z2
1	65.892	80.785	-152.856	-22.840	76.770	-152.856
2	97.470	-2.454	-152.856	11.435	-4.809	-152.856
3	54.280	-82.274	-152.856	-29.592	-86.049	-152.856
4	-8.078	-79.844	-152.856	-92.430	-85.072	-152.856
5	-10.433	14.330	-152.856	-96.689	10.010	-152.856
6	-4.194	85.733	-152.856	-92.480	80.666	-152.856
7	42.079	21.071	-152.856	-44.675	17.603	-152.856
8	35.215	-47.124	-152.856	-49.711	-50.772	-152.856

- Los resultados de los datos nuevos y los parámetros de orientación son:

Nueva Matriz Datos						
Punto	X1	Y1	Z1	X2	Y2	Z2
1	65.892	80.785	-152.856	-20.012	80.241	-151.463
2	97.47	-2.454	-152.856	12.745	-1.948	-152.816
3	54.28	-82.274	-152.856	-29.778	-82.39	-154.823
4	-8.078	-79.844	-152.856	-92.584	-80.238	-155.356
5	-10.433	14.33	-152.856	-95.082	14.888	-153.466
6	-4.194	85.733	-152.856	-89.565	85.438	-151.997
7	42.079	21.071	-152.856	-42.938	21.505	-152.855
8	35.215	-47.124	-152.856	-49.239	-46.75	-154.285

Nuevos Valores (Base x = 0, no se conoce su valor)					
Base y	Base z	Omega2	Phi2	Kappa2	Iteraciones
-0.0057rad	0.0084rad	-0.0196rad	0.0094rad	0.0182rad	5
0mm	0mm	-1.1238°	0.5404°	1.0418°	

- Y las precisiones de los resultados son las siguientes:

Diferencias entre los valores delta obtenidos					
Base y	Base z	Omega2	Phi2	Kappa2	Iteración
0	0	0	0	0	1
0.0051	-0.0085	-0.0196	0.0094	0.0182	2
-0.0049	0.0085	0.0197	-0.0092	-0.0182	3
0.0008	0.0008	0.0192	-0.0101	-0.018	4
-0.0016	-0.0012	0.0007	0.0005	-0.0003	5

Al igual que en la situación anterior, las precisiones resultan admisibles, el valor más alto de diferencia entre dos datos es de aproximadamente 0.092 grados decimales, por lo que los resultados se consideran correctos y la orientación elaborada exitosamente, lo que también permite aseverar el correcto funcionamiento de la herramienta diseñada.

Se desarrollaron dos situaciones diferentes, con omisión de la primera (el Panteón Nacional), un caso en donde ya se conocían las coordenadas imagen (ejemplo usado para el desarrollo en Excel) y otro caso donde las coordenadas imagen fueron obtenidas punto a punto sobre las mismas (imágenes aéreas), y los resultados en ambos casos fueron satisfactorios, lo que permitiría ratificar que el programa funciona y es posible realizar las orientaciones Absoluta y Relativa en el mismo.

Frente a estos resultados, es posible decir que la aplicación funciona con éxito, y hay que tener especial cuidado con las condiciones de toma de las imágenes, ya que hubo que corregir las imágenes del Panteón para obtener los resultados mostrados previamente, esto se debe principalmente a lo siguiente

1. Las imágenes no fueron tomadas perpendiculares a la base de los centros de toma, sino que se tomaron ambas apuntando hacia el panteón, por lo que tampoco su ángulo respecto a la base era cercano a los 90° , esto se realizó debido a que se buscaba garantizar la resección espacial de puntos, como se indicó durante la metodología, no sólo por esta razón se hizo esto sino también se tomaron las imágenes de esta forma para saber si era posible obtener buenos resultados bajo estas condiciones. Ante esta situación, es posible que al ser el valor del ángulo de toma respecto a la base menor de los 90° por una diferencia considerable, no sea posible hallar la convergencia en los valores resultantes de la orientación relativa. Ciertamente, lo más probable es que si los

ángulos hubieran sido cercanos a ser perpendiculares con la base los resultados obtenidos habrían sido diferentes.

2. En segunda opción, se encuentra el aspecto de la orientación interior (Calibración de la cámara) que no fue llevada a cabo previamente. Se conocen los parámetros de deformación del lente y las imprecisiones con las que trabaja la cámara empleada, pero las imágenes no fueron corregidas con esos parámetros de calibración, esto permitió conocer a efectos teóricos, mas no prácticos las posibles incongruencias, en caso de que se presentaran, por causa del lente. Por lo que este pudo ser también un factor influyente en los resultados poco satisfactorios obtenidos.

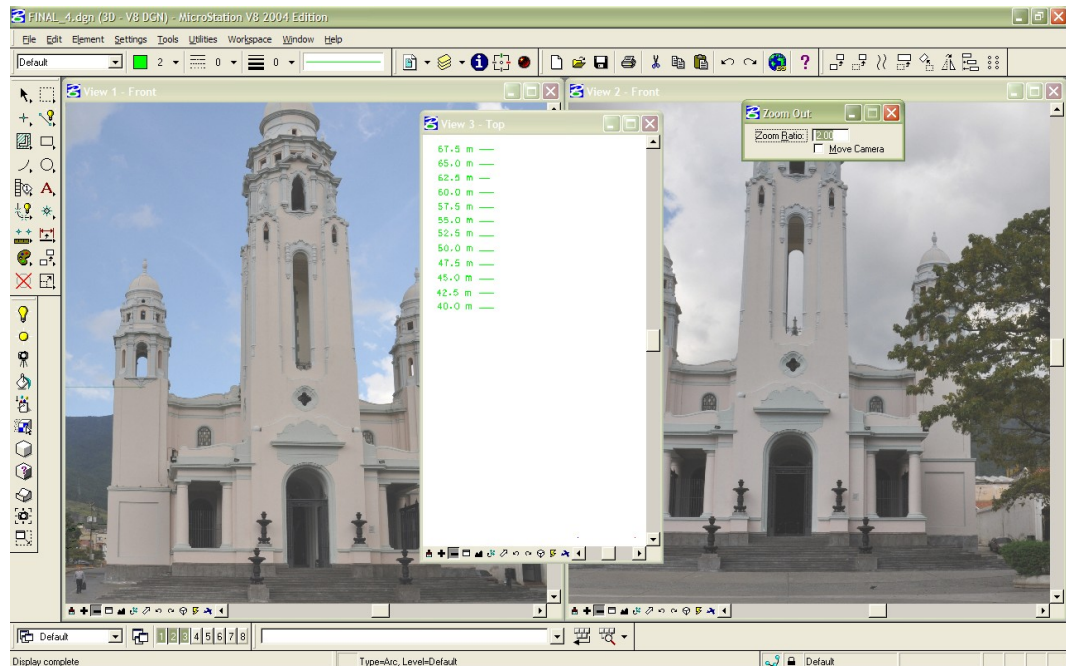
Pero una vez que se elaboraron las correcciones respectivas y se empleó la aplicación los resultados obtenidos fueron satisfactorios, ahora bien, para corroborar que luego de las orientaciones se pueden elaborar productos cartográficos, fue necesario realizar la restitución de elementos en tres dimensiones y comparar los valores reales finales que se obtengan en la herramienta con los valores obtenidos en el levantamiento topográfico, para así conocer las tolerancias sobre las que se trabaja.

Restitución de elementos en 3D

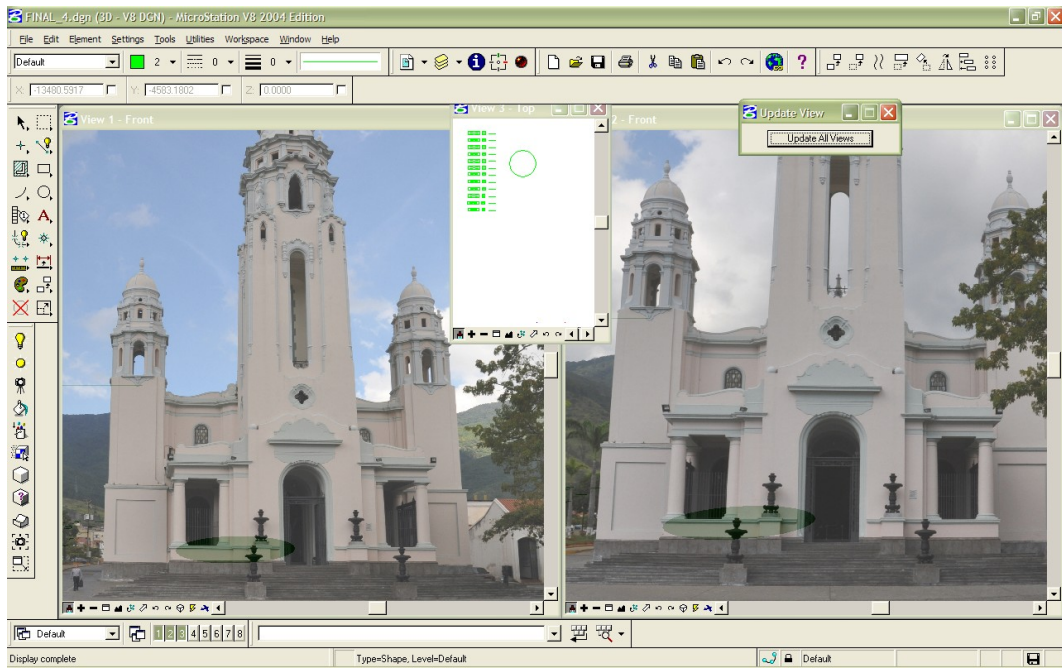
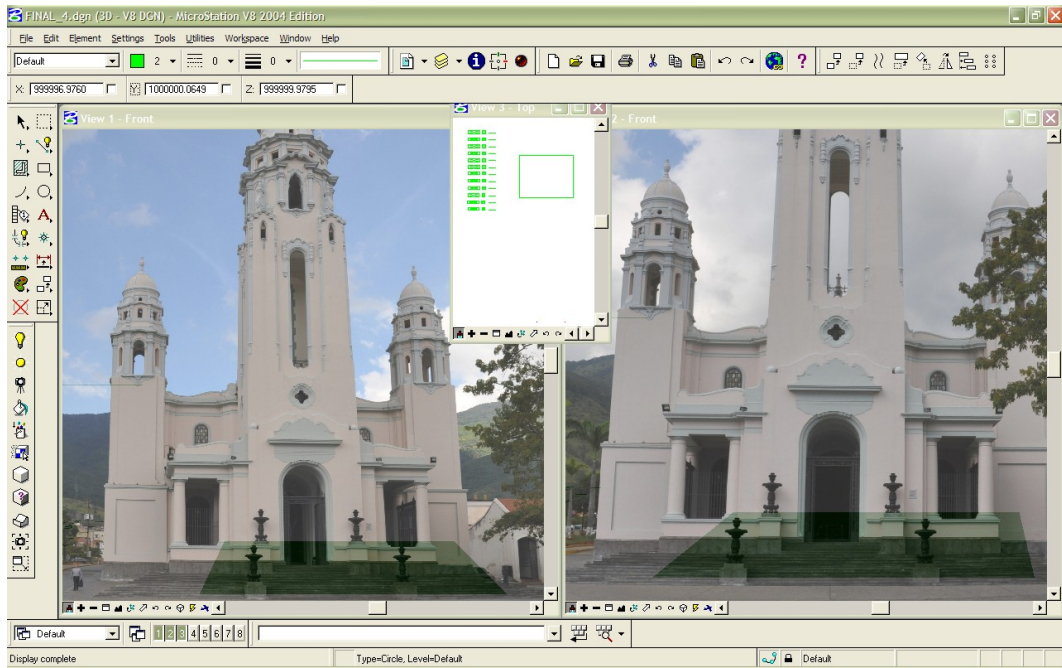
Una vez orientadas las fotografías es posible comenzar con la captura de las coordenadas X, Y, Z de cada elemento seleccionado, utilizando un estereoscopio de espejos aplicado al monitor. Para este proceso es indispensable trabajar con las dos ventanas abiertas en Microstation (que contengan las imágenes derecha e izquierda), con las características de la cámara aplicadas a cada una de ellas, y para el manejo de los planos activos de profundidad de campo, se utiliza otra ventana cuya vista sea desde arriba (*Top*), para observar ambas imágenes y establecer las

distancias desde ambas al elemento, que en este caso fue aproximadamente 50 metros, y sobre esta ventana comenzar a dibujar los distintos elementos geométricos como puntos, rectas, sólidos, etc, según el producto que se desee obtener. La elaboración de este procedimiento se ilustra a continuación:

- En este gráfico se muestra la ventana donde se manejan los planos de profundidad desde los centros de toma al elemento y con estos es posible digitalizar sobre el plano del elemento, a través del empleo de las imágenes.



- En las siguientes imágenes de la pantalla, se observa la digitalización de distintos elementos geométricos, se puede observar la representación de ambos en las imágenes pero se encuentra ubicado sobre la estructura, esto se puede lograr, ya que Microstation permite trabajar con la proyección cónica de la cámara.



Una vez que se comprobó que es posible la digitalización de elementos, es posible elaborar productos cartográficos de distinta índole, gracias a la aplicación desarrollada, y esto se logra también observando estereoscópicamente el estereopar, lo que facilita la digitalización de elementos.

Finalizada la implementación se midió la distancia existente entre dos puntos y se comparó con la distancia obtenida mediante las coordenadas del levantamiento topográfico, los resultados fueron los siguientes:

Punto	Coordenadas Levantamiento (m)				Modelo (m)				Diferencias entre ambos sistemas (m)
	X	Y	Z	Dist.	X	Y	Z	Dist.	
5	988,143	1.051,692		7,595	985,950	1060,000		9,224	1,630
6	980,890	1.049,440			995,170	1060,284			

Como se puede observar para una distancia de 50 metros, la diferencia obtenida es de aproximadamente 1,630 metros, lo que se considera aceptable pero no completamente satisfactorio, ya que es posible obtener precisiones mayores mejorando las condiciones de toma y asignando mayor peso a las consideraciones de la escala, más que a la convergencia de los resultados.

CAPÍTULO V . CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

- Se concluye que los objetivos planteados fueron logrados, se diseñó una aplicación informática que realiza la orientación absoluta y relativa de un estereopar.
- La aplicación desarrollada realiza los procedimientos de orientación absoluta y relativa, en todo momento en coordenadas reales tridimensionales.
- Se pueden realizar las orientaciones tanto de imágenes aéreas, como terrestres, obteniendo precisiones adecuadas para este tipo de de trabajo.
- La aplicación desarrollada permite generar diferentes productos cartográficos, como lo son digitalizaciones de estructuras, en el caso de Fotogrametría de Corto Alcance, generación de cartografía a partir de fotos aéreas, así como estudios y análisis derivados de los productos antes descritos.
- La metodología empleada de Condición de Coplaneidad por Empalme de Fotos Consecutivas, a pesar de que su desarrollo matemático es bastante tedioso, se logró realizar la aplicación de manera práctica y sencilla para el usuario.
- Será posible emplear la herramienta desarrollada con fines docentes, ya que es un software de código abierto, por lo que la explicación de su funcionamiento se facilita.
- Las precisiones a obtener con la aplicación desarrollada, estarán estrechamente ligadas a la geometría de toma de las fotos, así como las características geométricas de la cámara. De igual forma, los valores de coordenadas medidos en terreno, deben ser medidos con las tolerancias debidas.

- Con el cálculo de calibración interior de la cámara utilizada, realizada en el programa PhotoModeler®, se determinaron los parámetros K_1 , K_2 y K_3 , y P_1 y P_2 que representan las distorsiones, radial y tangencial, de la lente de la cámara. En este proyecto, las imágenes no se corrigieron con estos valores, porque no se consideró necesario.

5.2. Recomendaciones

- Continuar con líneas de investigación, basadas en el desarrollo de otras aplicaciones en otras de las muchas áreas existentes, para que el proyecto de crear aplicaciones propias de la Fotogrametría Digital continúe creciendo.
- Promover el uso de herramientas como Visual Basic en combinación con otras plataformas cartográficas como la de Microstation, para facilitar el trabajo y expandir y mejorar sus desempeños.
- Difundir el uso de esta herramienta tanto en los profesores de la universidad como en diversas instituciones, para motivar al continuo desarrollo de la misma.
- Conocer y aprender a utilizar todas las bondades de trabajo que presenta Microstation, para así poder aprovechar al máximo los fines todas las aplicaciones, facilitando la generación de productos.
- Planificar los procesos del levantamiento de información, específicamente al establecimiento del ángulo de toma de los ejes ópticos de las cámaras y al levantamiento topográfico para así poder estimar las precisiones y tolerancias que deben obtenerse.
- Si es posible, corregir las imágenes adquiridas con los parámetros de calibración de la cámara (distorsiones del lente), utilizando programas como ERDAS Imagine para aumentar la exactitud de los resultados.
- Incorporar rutinas de programación que faciliten y simplifiquen aún más el desempeño de la aplicación.

BIBLIOGRAFÍA

- American Society of Photogrammetry, .. (1980). *Manual of Photogrammetry*. Washington, D.C: George Banta Publishing CO.
- Jauregui, L. (2005). *Web del Profesor/ULA/Cámara Fotogramétrica*. Recuperado el 2009, de Publicaciones: <http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/iluis/publicaciones/Fotogrametr%EDa/CAPITULO%203.pdf>.
- Jauregui, L. (2005). *Web del Profesor/ULA/Nociones de Fotogrametría Digital*. Recuperado el Julio de 2009, de Publicaciones: <http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/iluis/publicaciones/Fotogrametr%EDa/FOTOGRAMETRIA%20DIGITALparte1.pdf>.
- Jauregui, L. (2005). *Web del Profesor/ULA/Paralaje*. Recuperado el Noviembre de 2009, de Publicaciones: <http://ws-01.ula.ve/ingenieria/iluis/publicaciones/Fotogrametr%EDa/CAPITULO5.pdf>
- Leica*. (s.f.). Recuperado el Octubre de 2009, de http://www.leica-geosystems.com/en/Leica-RC30_57632.htm
- Muro Morales, J. I., Urteaga, L., & Nadal, F. (2002). *La Fotogrametría Terrestre en España (1914-1958)*. Recuperado el 28 de Junio de 2009, de Investigaciones Geográficas: <http://www.cervantesvirtual.com/servlet/SirveObras/04694173411581584197857//catalogo27//07inve27.pdf>
- Nikon®. (s.f.). *Nikon®*. Recuperado el Noviembre de 2009, de <http://imaging.nikon.com/products/imaging/technology/history/rhnc03f3-e/>
- Nikon®. (s.f.). *Nikonusa*. Recuperado el Septiembre de 2009, de <http://www.nikonusa.com>

- Orellana Ramírez, R. (2006). *Apuntes de Fotogrametría*. Internet.
- Pérez Álvarez, J. A. (2001). *Apuntes de Fotogrametría II*. Mérida: Universidad de Extremadura.
- PhotomodelerHelp. (s.f.).
- Sánchez Martín, N., Arias Pérez, B., González Aguilera, D., & Gómez Lahoz, J. (2004). *Análisis Aplicado de Métodos de Calibración de Cámaras para Usos Fotogramétricos*. Madrid.
- Sánchez Sobrino, J. A. (2006). *Introducción a la Fotogrametría*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- Schenk, T. (2002). *Fotogrametría Digital*. Catalunya: Marcombo.
- UCV, U. C. (s.f.). *Centro de Documentación del Patrimonio Cultural*. Recuperado el Enero de 2010, de <http://web.ucv.ve/patrimonioenlinea/patrimonioyfotogrametria.html>
- Venciclopedia, L. (s.f.). *Venciclopedia*. Recuperado el Diciembre de 2009, de http://www.google.co.ve/imgres?imgurl=http://venciclopedia.com/images/thumb/9/95/Panteon_Nacional_siglo_XIX_2.jpg/250px-Panteon_Nacional_siglo_XIX_2.jpg&imgrefurl=http://venciclopedia.com/index.php%3Ftitle%3DPante%25C3%25B3n_Nacional&h=248&w=250&sz=28&tbid
- Venezolano, O. d. (s.f.). *Instituto de Patrimonio Cultural*. Recuperado el 18 de Enero de 2010, de <http://www.ipc.gob.ve/images/stories/ley/leypatrimonio.pdf>
- Wolf, P. R., & Dewitt, B. A. (2000). *Elements of Photogrammetry, With Applications in GIS*. United States of America: McGraw-Hill.

ANEXOS

- Manual de Usuario de la Aplicación

APLICACIÓN DIGITAL PARA LA ORIENTACIÓN DE PARES ESTEREOGRÁFICOS, CON FINES CARTOGRÁFICOS.

MANUAL DE USUARIO



Elaborado por: Br. María Fernanda García
En Colaboración con: Prof. Julián García

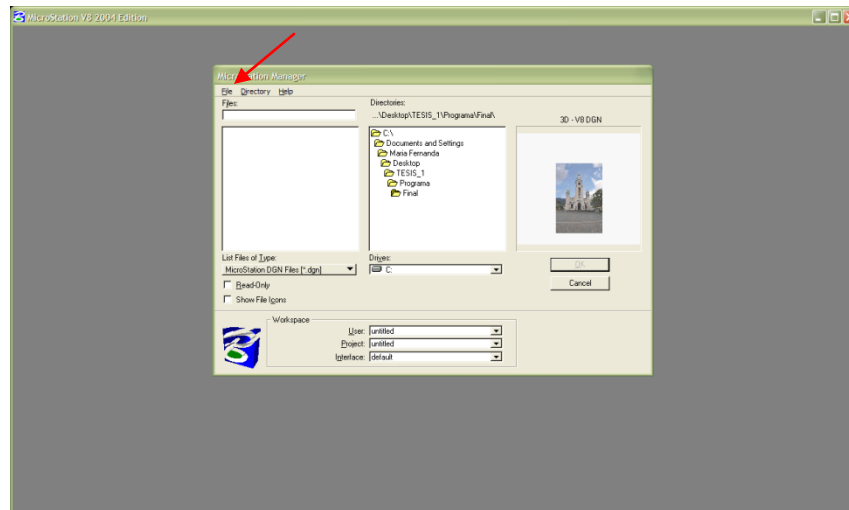
El siguiente manual tiene la finalidad de instruir al usuario en el uso del sistema, y sus alcances.

La aplicación digital consiste en la elaboración de la orientación relativa y absoluta de un par estereoscópico, empleando los valores de coordenadas de los centros de toma de las imágenes objeto de estudio o los valores de coordenadas imagen, en caso de que ya se posean.

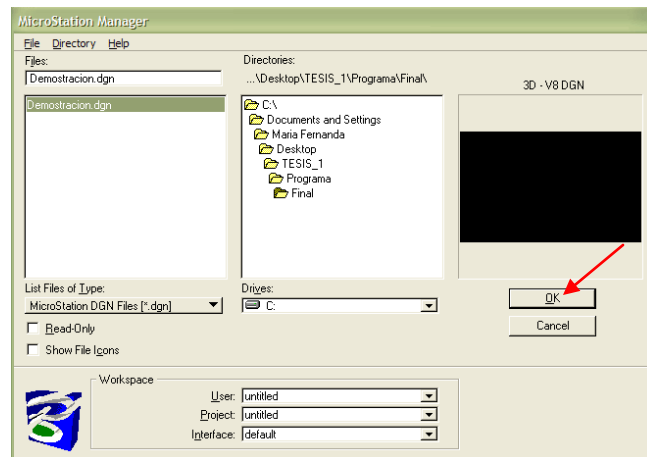
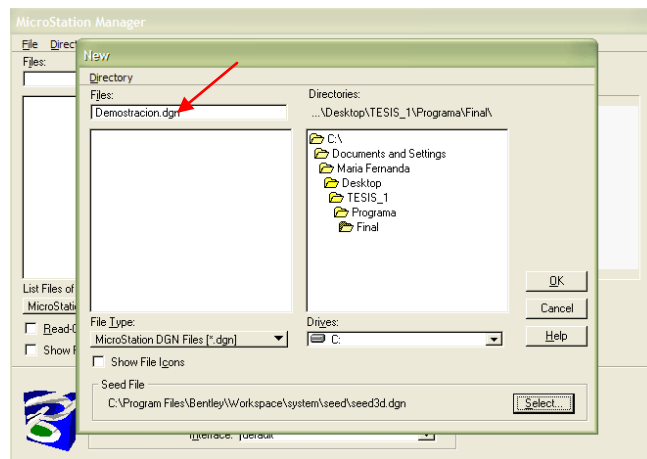
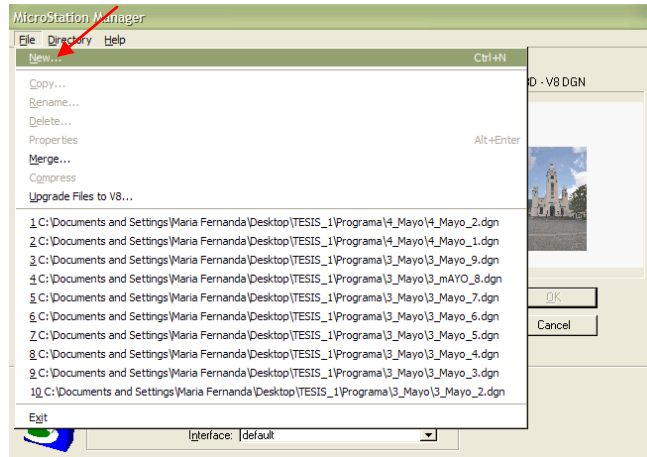
La plataforma sobre la cual trabaja la herramienta se denomina Microstation, que consiste en un CAD (*Computer Aided Design*), por lo que antes de iniciar el uso de la aplicación se deben elaborar ciertas rutinas en este ambiente.

A continuación se presentará cada una de las ventanas que despliega el sistema y las funciones que tiene cada uno de los elementos que allí aparecen, así como las rutinas que deben ser desarrolladas previamente en Microstation.

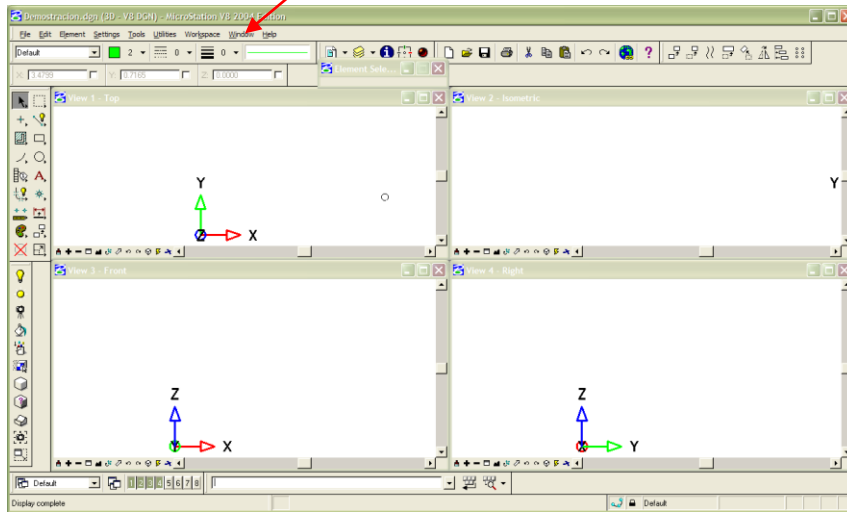
1. Se inicializa la plataforma de Microstation con la siguiente ventana:



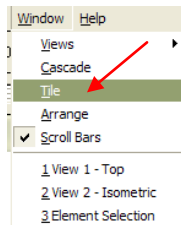
En esta ventana se selecciona la opción para crear un nuevo archivo en el menú de *File*, que se encuentra ubicado en la parte superior izquierda del cuadro de diálogo, allí solicitará colocar un nombre al nuevo proyecto y en que ubicación del procesador será colocado:

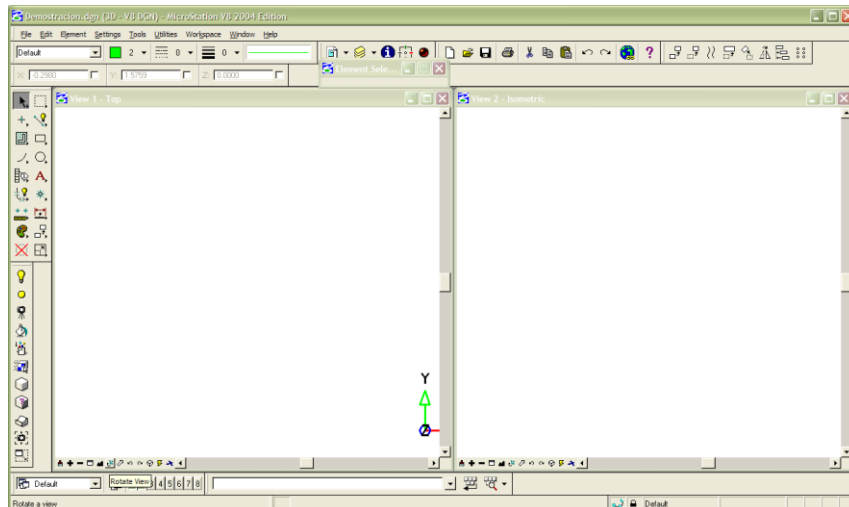



2. Una vez creado el proyecto, se abre el escritorio de trabajo, sobre el cual serán insertadas las imágenes posteriormente, ese ambiente es el siguiente:

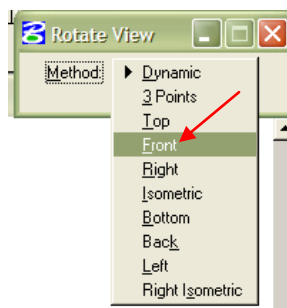


Para poder trabajar en este escritorio, son necesarios algunos pasos previos, en primer lugar se cierran las ventanas 3 y 4, y en el menú de *Window* en la parte superior de la pantalla se elige la opción de *Tile*, de manera que las dos ventanas restantes ocupen toda la pantalla, como se muestra a continuación:

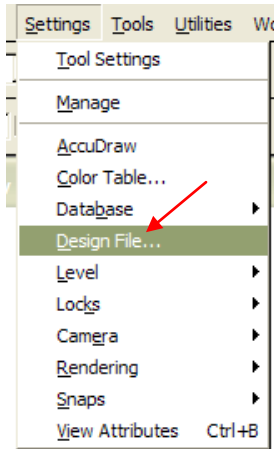




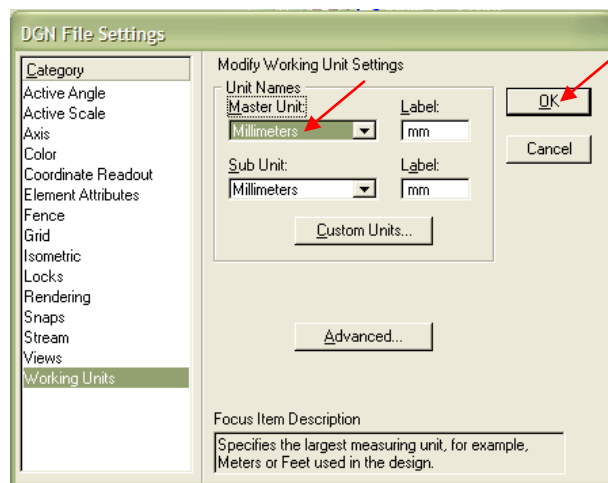
3. Para poder insertar las imágenes, es necesario que el ángulo de las vistas sea de frente, *Front*, por lo que se selecciona el siguiente ícono: , que se encuentra en la parte inferior del menú de cada ventana. Y allí se selecciona la vista en *Front*, este paso es fundamental para poder insertar las imágenes posteriormente.



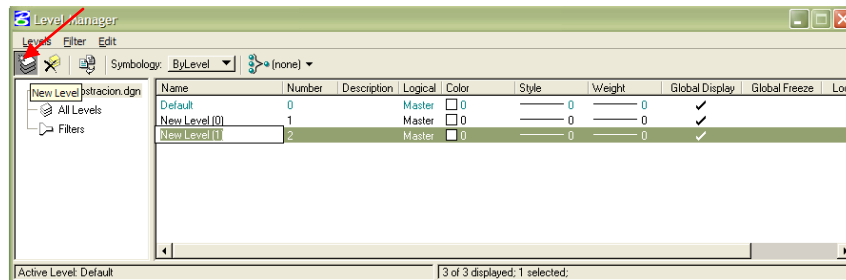
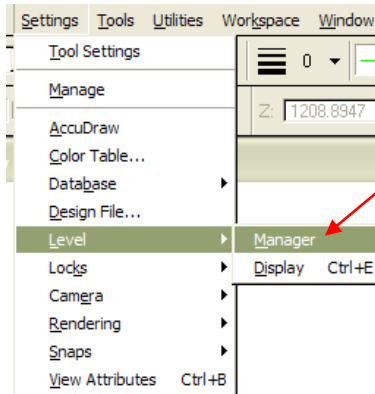
4. Ahora bien, con las imágenes ventanas en un ángulo de frente, se procede a verificar las unidades de trabajo del proyecto, esto se hace seleccionando la opción de *Settings* en el menú superior del escritorio de Microstation.



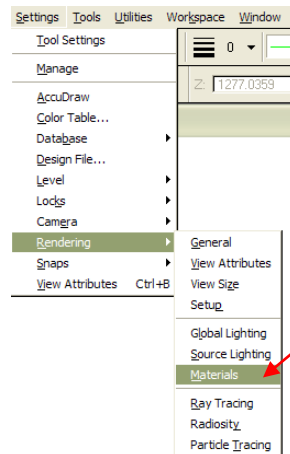
Una vez abierto este menú, se selecciona la opción del archivo de diseño, *Design File*, y allí se abre un cuadro de diálogo, donde se debe verificar que todas las unidades se encuentren en milímetros, una vez hecho esto se oprime el botón de Ok.



5. Luego se deben generar dos capas, *Levels*, de trabajo, esto con la finalidad de insertar también las imágenes en diferentes capas, este proceso de inserción es llevado a cabo por la aplicación, por lo que no es necesario que se asignen nombres a las nuevas capas creadas. Para esto, en el menú superior del escritorio de Microstation se selecciona la opción de *Settings* y allí se elige la opción de *Level* → *Manager*, donde se abre un cuadro de diálogo que permite generar los dos nuevos niveles.

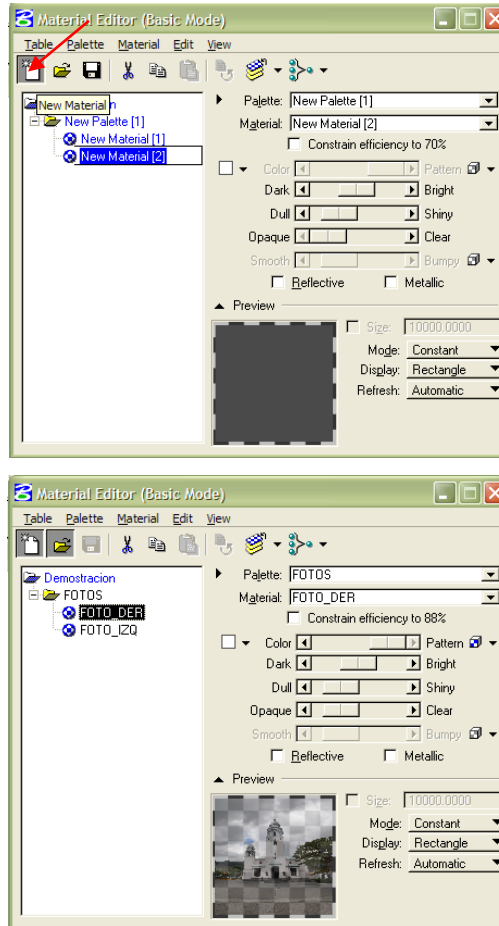


6. El último paso que se debe hacer en Microstation antes de inicializar la aplicación, es la creación de las dos capas de Materiales donde serán colocadas las imágenes y donde podrán ser manipuladas sus características. Para la creación de éstas, se debe volver al menú de Settings y allí se selecciona la opción de *Rendering* → *Materials*.

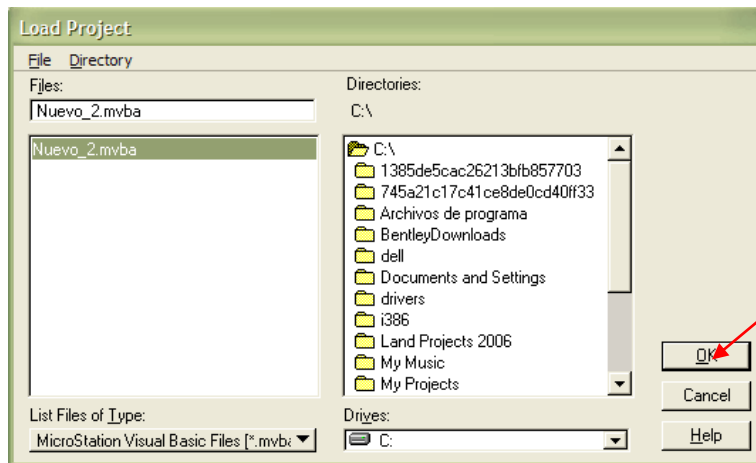
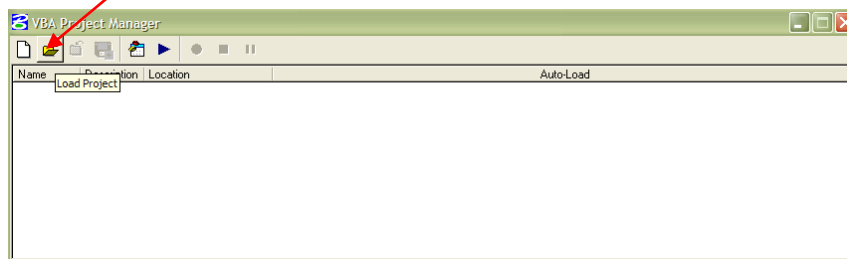
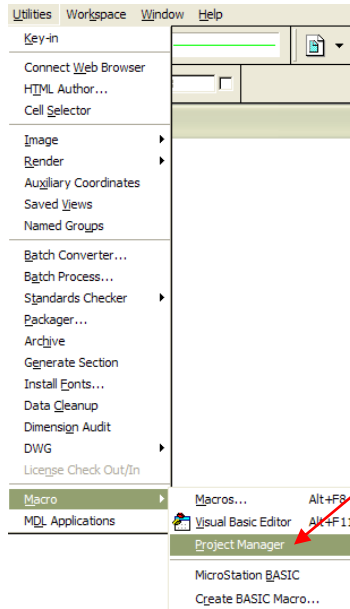


Se abre el cuadro de diálogo correspondiente a esta opción seleccionada y allí se genera una nueva Paleta con dos nuevos materiales, *Palettes*, como se ilustra a continuación. Esa nueva Paleta debe denominarse FOTOS y los nuevos materiales

deben denominarse FOTO_IZQ y FOTO_DER. Si se desea, se puede elegir en ese mismo menú que las imágenes sean semi-transparentes, para que una vez finalizadas las orientaciones, se pueda comenzar con los procesos de digitalización o análisis de imágenes.

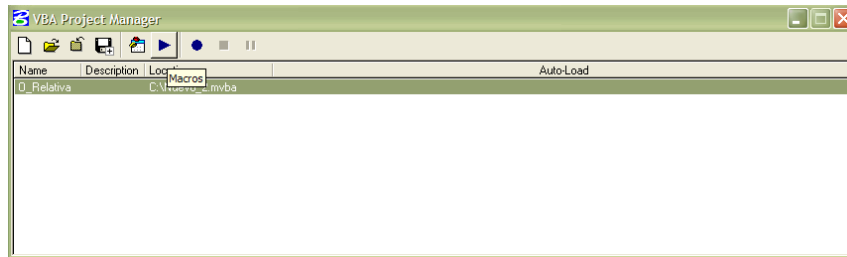


7. Ahora bien, para inicializar la aplicación, en el menú superior de la interfase de Microstation se selecciona la opción de *Utilities* → *Macro* → *Project Manager*, y se abre su menú correspondiente, en donde se cargará la aplicación, programada en el módulo de Visual Basic for Applications (VBA), que se encuentra almacenado en un archivo del computador, en la dirección que se desee.

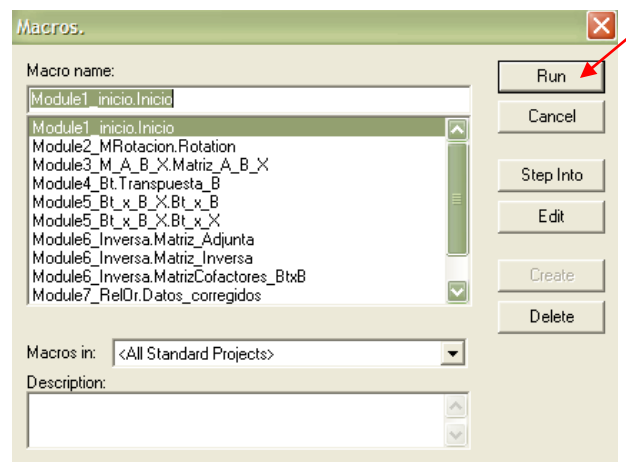


8. Una vez ubicada la aplicación, se selecciona la opción de Ok y se abre en el VBA Project Manager, y allí se debe presionar el botón de Play para comenzar a utilizar la herramienta.

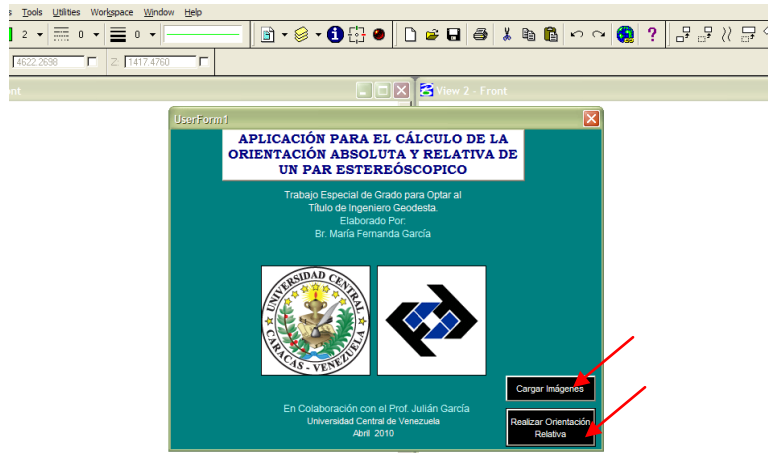




Al inicializar la aplicación, aparece un menú, para elegir en qué módulo debe comenzar, se debe verificar que se encuentre elegido el *Module 1* y se presiona el botón de *Run*, para elaborar las orientaciones.

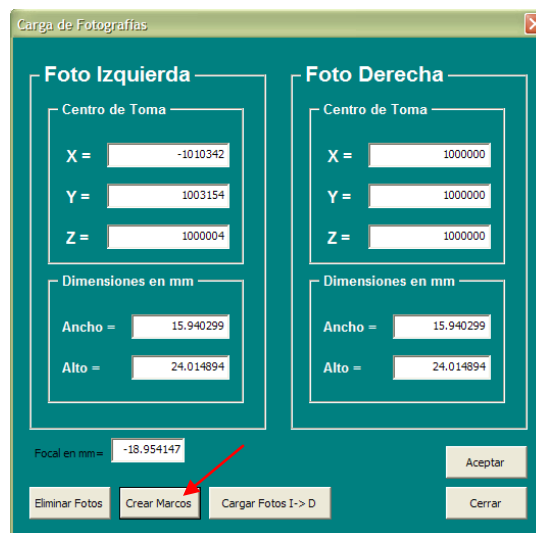


9. En este paso se comienza a utilizar la aplicación, bajo las condiciones necesarias anteriormente establecidas. Aparece la pantalla de inicio, en donde se presentan dos opciones:
 - Cargar Imágenes: este botón se utiliza para insertar las imágenes en la plataforma Microstation, en caso de que no se posean las coordenadas imagen y se desee capturarlas mediante la marcación de puntos sobre ellas.
 - Realizar Orientación Relativa: Este botón se selecciona cuando ya se conozcan las coordenadas imagen, almacenadas en un archivo de texto separado por comas, y lo que se desee es realizar directamente la orientación, o cuando ya las imágenes se encuentren insertadas y lo que se quiera es realizar la marcación de puntos para orientar, obviando el paso de carga de imágenes.

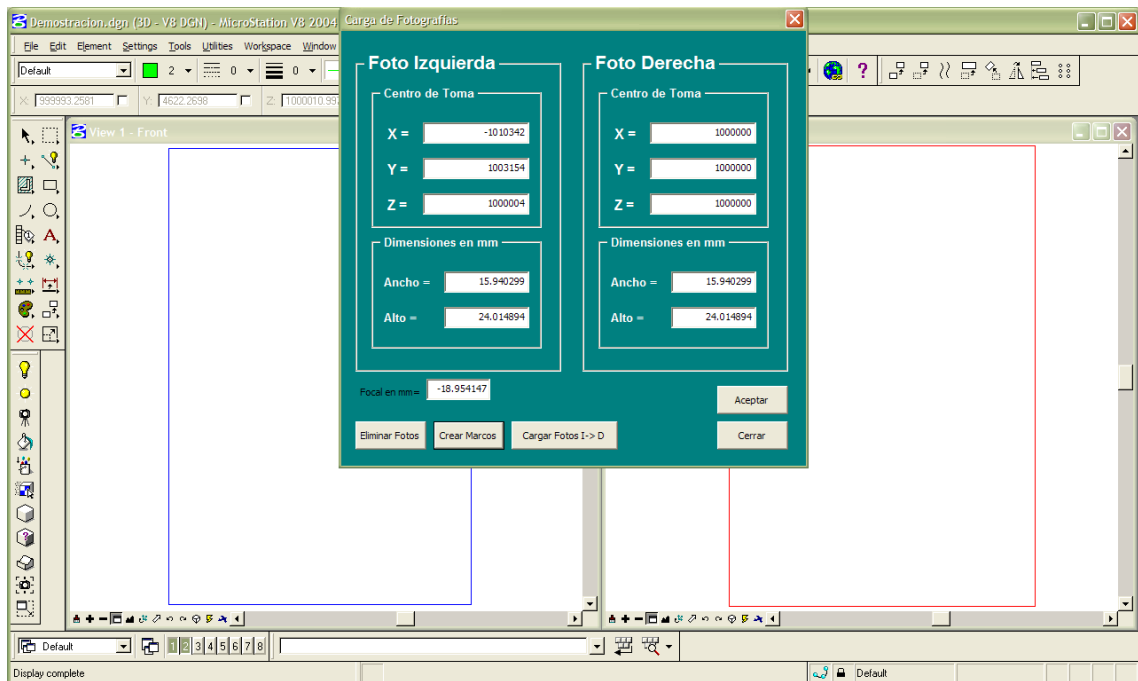


Los pasos del número 10 al 12 corresponden con el proceso de Carga de Imágenes, en el caso que se seleccione esta opción:

10. Al presionar el botón Carga de Imágenes, se abre un cuadro de diálogo, donde se deben colocar las dimensiones del formato de la imagen en milímetros, así como la distancia focal en milímetros y las coordenadas de los centros de toma igualmente en milímetros. Este procedimiento se corresponde con el proceso de Orientación Absoluta, ya que las imágenes son ubicadas en el plano real del terreno. Por esta razón las unidades deben ser uniformes y se debe tener seguridad de que estos valores fueron obtenidos con las precisiones requeridas, según sea el producto que se quiera.



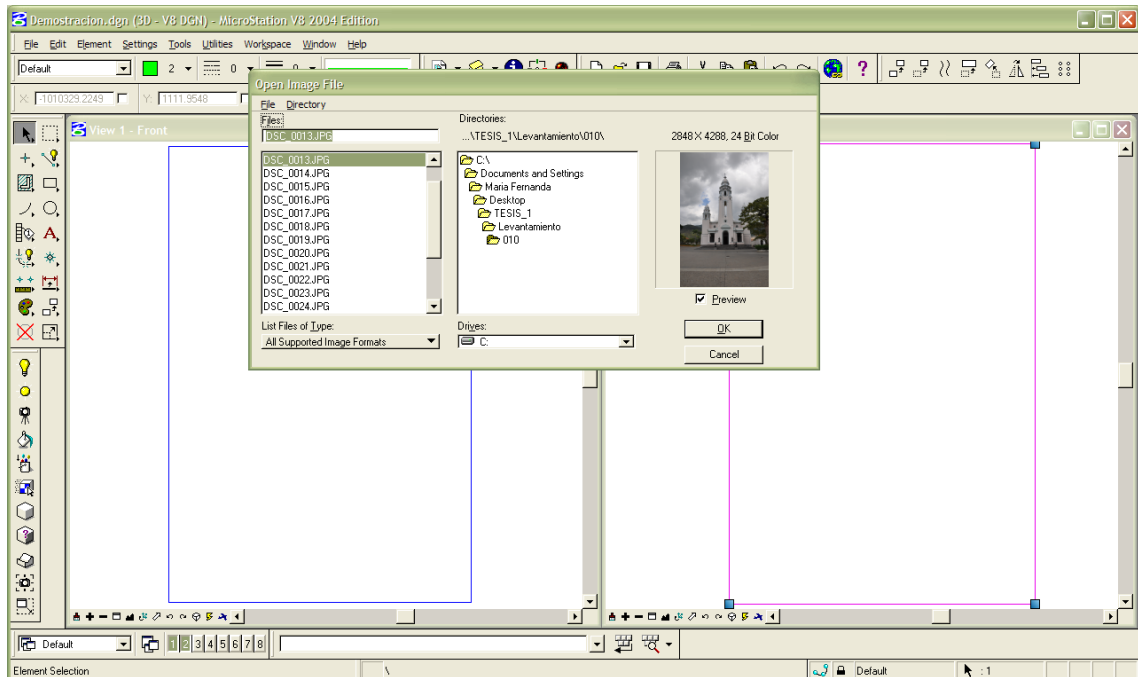
Una vez colocados los valores, se recomienda verificar que estén colocados todos correctamente, y si esto se cumple, seleccionar la opción de Crear Marcos, esta opción genera unos cuadros o marcos en donde serán insertadas las imágenes. Una vez que se selecciones este botón, es posible observar los marcos creados en cada ventana utilizando las herramientas de acercamiento o alejamiento. El marco para la ventana izquierda, que se corresponde con la Imagen Izquierda, es de color azul y el de la derecha que corresponde a la Imagen Derecha es de color rojo, como se muestra a continuación:




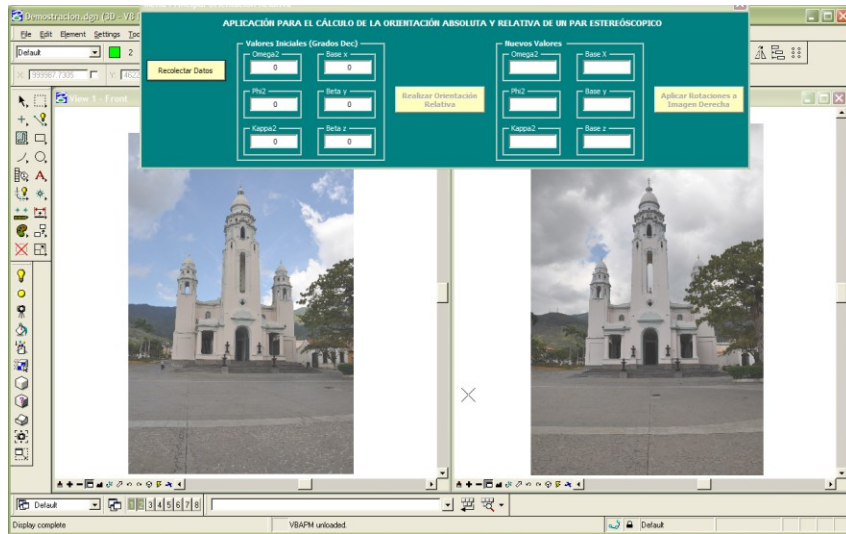
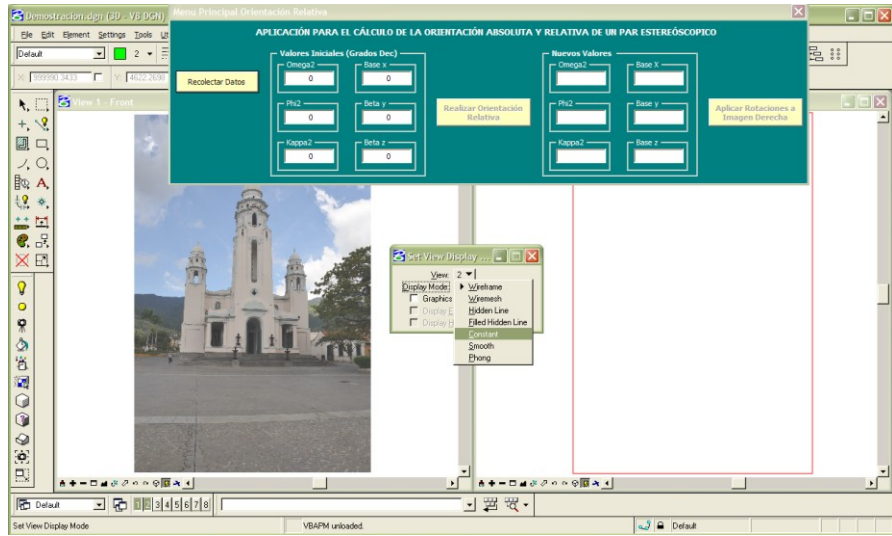
Se pueden verificar las coordenadas de los marcos introducidos seleccionándolos con la herramienta del puntero y haciendo click sobre un icono en la parte superior del menú de Microstation, identificado con una letra “i”, que muestra la información del elemento seleccionado.

11. Ahora en el mismo Menú se presiona el botón de Cargar Fotos y se abre un cuadro de diálogo, donde se debe ubicar el directorio donde se encuentran las fotografías para insertar en un orden establecido la de la Derecha e Izquierda, lo que permite saber cuál se inserta primero es que el marco de la que se este

solicitando se encuentra resaltado. De esta manera se insertan ambas imágenes y se presiona Aceptar en el Menú.



12. Una vez insertadas ambas imágenes se abre el Menú Principal de Orientación Relativa. Pero antes de pasar a este procedimiento, para observar las imágenes dentro de los marcos, se debe seleccionar el ícono de  en la parte inferior de cada ventana de las imágenes y allí se debe elegir la opción de *Constant*, una vez que se visualicen ambas fotografías se recomienda corroborar que fueron insertadas correctamente.



El procedimiento descrito anteriormente (pasos 10 al 12) corresponde con la inserción de imágenes, que al concluir el mismo, se procede a la elaboración de la Orientación Relativa, por lo que el menú corresponde al mismo que surge cuando al inicio de la aplicación se selecciona Realizar Orientación Relativa en vez de Cargar Imágenes, que es el siguiente:

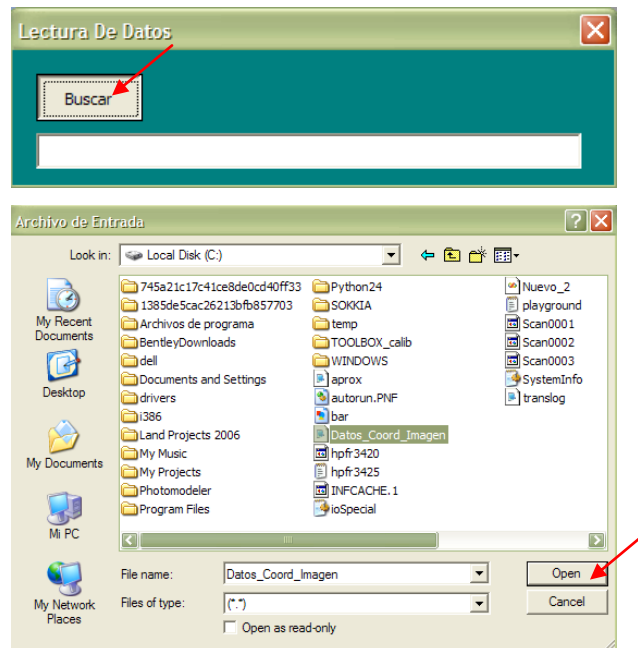


En este menú, lo primero que debe seleccionarse es la manera de adquirir los datos de coordenadas imagen con los que será calculada la orientación relativa. Se presentan dos opciones:

- Recolectar los Datos desde un Archivo: cualquier archivo de texto que posea coordenadas imagen, organizado de la siguiente manera: la primera columna corresponde al número de punto, las siguientes tres columnas a las coordenadas x, y, z de la imagen izquierda respectivamente y las siguientes tres columnas a las coordenadas de la imagen derecha, en el mismo orden que la izquierda; todos los valores debe estar separados por coma, aquí se ilustra un ejemplo de esto:

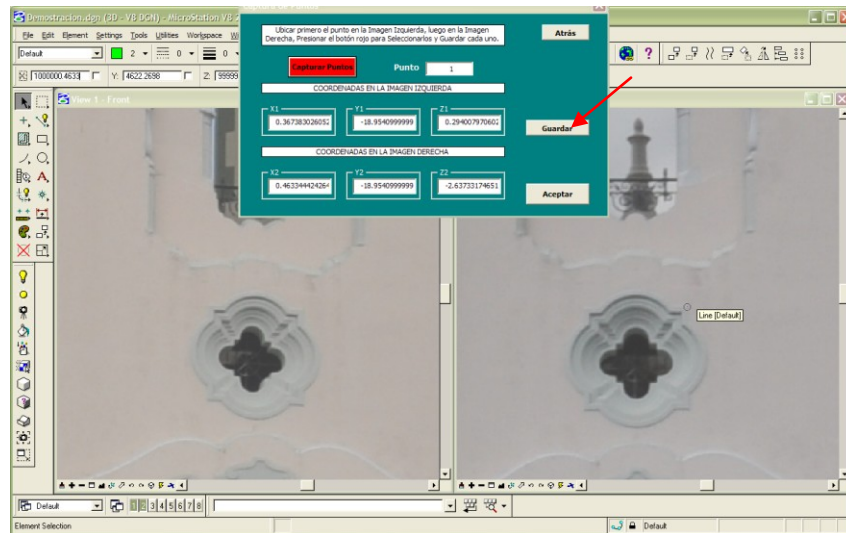
```
1,65.892,80.785,-152.856,-22.840,76.770,-152.856
2,97.470,-2.454,-152.856,11.435,-4.809,-152.856
3,54.280,-82.274,-152.856,-29.592,-86.049,-152.856
4,-8.078,-79.844,-152.856,-92.430,-85.072,-152.856
5,-10.433,14.330,-152.856,-96.689,10.010,-152.856
6,-4.194,85.733,-152.856,-92.480,80.666,-152.856
7,42.079,21.071,-152.856,-44.675,17.603,-152.856
8,35.215,-47.124,-152.856,-49.711,-50.772,-152.856
```

Al seleccionar esta opción, aparece la opción para ubicar el archivo de texto y mostrarlo en pantalla, de manera que se verifique que el archivo elegido es el correcto.





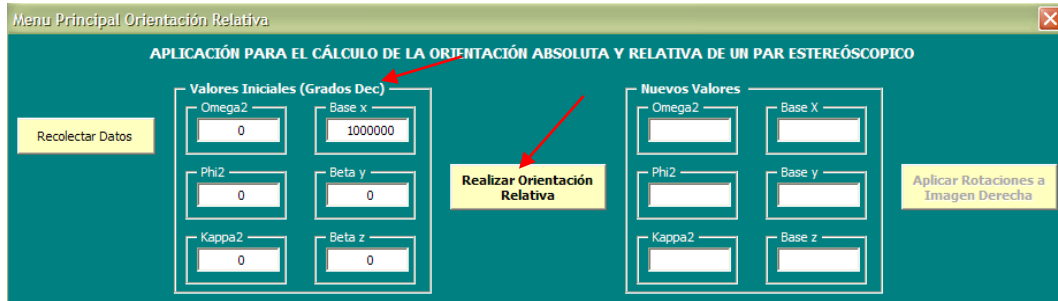
Luego se marca el punto en la imagen derecha y sus coordenadas aparecen en el cuadro de diálogo en el área que corresponde a esta imagen.



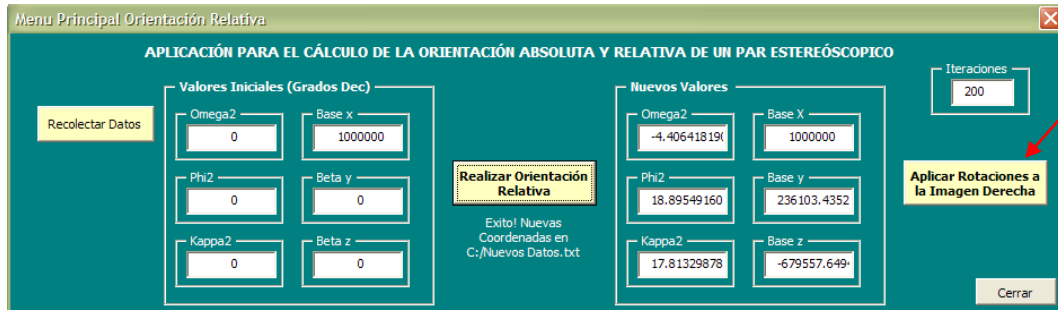
Después de marcar cada punto en ambas imágenes, se debe presionar el botón de guardar, para ir almacenando estos valores en una matriz denominada Datos, que se almacena en la raíz C:/ del computador, en formato texto y puede ser verificada al finalizar la señalización de los puntos.

Luego de marcar todos los puntos se presiona el botón de Aceptar y se regresa al Menú Principal para realizar la Orientación Absoluta.

13. Una vez que se posean los valores de coordenadas imagen, ya sea desde un archivo o desde la imagen, se deben introducir los valores iniciales en el Menú Principal, para posteriormente presionar el botón de Realizar Orientación Relativa:



14. Una vez insertados los valores iniciales, se verifican que hayan sido introducidos correctamente y se oprime el botón para llevar a cabo el proceso de Orientación Relativa, el cual una vez culminado, presenta los valores de los parámetros de rotación y de las bases finales halladas, así como la cantidad de iteraciones realizadas para alcanzar la precisión.



Los valores resultantes de la Orientación: una Nueva Matriz de Datos, los valores de los parámetros y las bases, así como las Diferencias que representan las precisiones son almacenados en dos archivos de texto en la raíz C:/ del computador.

15. Finalizada la Orientación Relativa, se oprime el botón para aplicar las rotaciones y traslaciones respectivas halladas, y así poder eliminar el paralaje en Y, obteniendo un modelo orientado y en coordenadas reales, sin necesidad de transformar a coordenadas modelo. Por lo que, una vez listo el procedimiento, se puede comenzar a generar los productos que se deseen.

