[**Índice de Figuras 10**](#_Toc370203205)

[**Índice de tablas 13**](#_Toc370203206)

[**1.** **Introducción 14**](#_Toc370203207)

[1.1. Introducción y antecedentes 14](#_Toc370203208)

[GPS/IMU, 18](#_Toc370203209)

[1.2. Objetivos 20](#_Toc370203210)

[1.3. Estructura de la Tesis 21](#_Toc370203211)

[**2.** **Estudio teórico 23**](#_Toc370203212)

[2.1. Sistemas de coordenadas 23](#_Toc370203213)

[*2.1.1.* *Sistema geodésico elipsoidal 24*](#_Toc370203215)

[*2.1.2.* *Sistema geodésico local 25*](#_Toc370203216)

[*2.1.3.* *Sistema astronómico local 26*](#_Toc370203217)

[*2.1.4.* *Sistema imagen 27*](#_Toc370203218)

[*2.1.5.* *Sistema IMU 29*](#_Toc370203219)

[2.2. Sistemas de referencia geodésicos globales, GRS80 y GRS84 32](#_Toc370203220)

[2.3. Transformación entre sistemas 34](#_Toc370203221)

[*2.3.1.* *Transformación de ECEF a Geodésicas 35*](#_Toc370203224)

[*2.3.2.* *Transformación de Geodésicas a ECEF 36*](#_Toc370203225)

[*2.3.3.* *Transformación de ECEF a ENUG 37*](#_Toc370203226)

[*2.3.4.* *Transformación IMU a ENUG 40*](#_Toc370203227)

[2.4. Precisión en la transformación de coordenadas 41](#_Toc370203228)

[*2.4.1.* *Precisión en coordenadas geocéntricas (ECEF) a partir de la precisión en coordenadas geodésicas (λ, φ, h) 42*](#_Toc370203230)

[*2.4.2.* *Precisión en coordenadas geodésicas (λ, φ, h) a partir de la precisión en coordenadas geocéntricas (ECEF) 43*](#_Toc370203231)

[*2.4.3.* *Precisión en coordenadas cartesianas geocéntricas (ECEF) a partir de la precisión en geodésicas locales (ENUG) 44*](#_Toc370203232)

[*2.4.4.* *Precisión en coordenadas geodésicas locales (ENUG) a partir de la precisión en cartesianas geocéntricas (ECEF) 45*](#_Toc370203233)

[2.5. Principios de la navegación inercial 46](#_Toc370203234)

[2.6. Introducción a los sensores de navegación utilizados en el sistema fotogramétrico multisensorial 48](#_Toc370203235)

[*2.6.1.* *Global Navigation Satellite System (GNSS) 48*](#_Toc370203238)

[Técnicas de observación 49](#_Toc370203239)

[Precisión y errores 51](#_Toc370203240)

[*2.6.2.* *Unidad de medida inercial (IMU) 52*](#_Toc370203241)

[Acelerómetros 53](#_Toc370203242)

[Giróscopos 54](#_Toc370203243)

[Errores de la IMU 57](#_Toc370203244)

[*2.6.3.* *Sistema de captura de datos multisensorial 58*](#_Toc370203245)

[2.7. Integración GNSS/IMU 59](#_Toc370203246)

[*2.7.1.* *Modo no acoplado 60*](#_Toc370203247)

[*2.7.2.* *Modo ligeramente acoplado 60*](#_Toc370203248)

[*2.7.3.* *Modo totalmente acoplado 61*](#_Toc370203249)

[*2.7.4.* *Precisiones de la integración GNSS/IMU 62*](#_Toc370203250)

[*2.7.5.* *Alineación de un sistema inercial 63*](#_Toc370203251)

[*2.7.6.* *Filtro Kalman 64*](#_Toc370203252)

[**3.** **Sistema Fotogramétrico Multisensorial 65**](#_Toc370203253)

[3.1. Diseño del sistema multicámara portátil GNSS/INS 65](#_Toc370203254)

[3.2. Receptor GNSS 66](#_Toc370203255)

[3.3. Unidad de Medida Inercial 67](#_Toc370203257)

[3.4. Sensores fotogramétricos 68](#_Toc370203258)

[3.5. Georreferenciación de las imágenes 69](#_Toc370203259)

[3.6. Cálculo de la orientación externa directa de la cámara 71](#_Toc370203261)

[3.7. Calibración de las cámaras y del sistema fotogramétrico multicámara portátil GNSS/INS 74](#_Toc370203262)

[*3.7.1.* *Calibración sensores ópticos 75*](#_Toc370203263)

[3.7.1.1. Distorsión radial 77](#_Toc370203264)

[3.7.1.2. Distorsión tangencial 78](#_Toc370203265)

[3.7.1.3. Distorsión afín 78](#_Toc370203266)

[*3.7.2.* *Calibración del sistema fotogramétrico multicámara portátil GNSS/INS 79*](#_Toc370203267)

[3.7.2.1. Excentricidad Receptor GNSS-IMU 79](#_Toc370203268)

[3.7.2.2. Excentricidad IMU-Cámara 79](#_Toc370203269)

[3.7.2.3. Desalineamiento de ejes IMU-Cámara 80](#_Toc370203270)

[3.7.2.4. Translación y deriva del receptor GNSS 80](#_Toc370203271)

[3.7.2.5. Modelo matemático 81](#_Toc370203272)

[3.8. Constreñimientos del sistema 83](#_Toc370203273)

[*3.8.1.* *Constreñimiento de base 84*](#_Toc370203275)

[*3.8.2.* *Constreñimiento de convergencia de ejes 85*](#_Toc370203276)

[**4.** **Metodología 87**](#_Toc370203277)

[4.1. Esquema de trabajo 87](#_Toc370203278)

[4.2. Proceso 88](#_Toc370203280)

[4.3. Sincronización de los sensores 91](#_Toc370203281)

[4.4. Generación del registro de la INS 93](#_Toc370203282)

[4.5. Calibración geométrica de las cámaras 95](#_Toc370203283)

[4.6. Importación de constreñimientos geométricos 98](#_Toc370203284)

[4.7. Orientación Absoluta 99](#_Toc370203285)

[4.8. Calibración del sistema fotogramétrico GNSS/INS 100](#_Toc370203286)

[**5.** **Aplicación de la metodología 102**](#_Toc370203287)

[5.1. Georreferenciación 102](#_Toc370203288)

[*5.1.1.* *Georreferenciación directa 105*](#_Toc370203289)

[*5.1.2.* *Georreferenciación directa con ajuste de haces (Georreferenciación mixta) 107*](#_Toc370203290)

[*5.1.3.* *Estudio del comportamiento de ajuste de haces con y sin constreñimientos 110*](#_Toc370203291)

[*5.1.4.* *Georreferenciación directa con imágenes de formato reducido 117*](#_Toc370203292)

[5.2. Generación de la nube de puntos 3D 120](#_Toc370203293)

[**6.** **Conclusiones y futuras líneas de investigación 123**](#_Toc370203294)

[6.1. Conclusiones 123](#_Toc370203295)

[6.2. Futuras líneas de investigación 125](#_Toc370203296)

[**7.** **Referencias bibliográficas 126**](#_Toc370203297)

[7.1. Bibliografía 126](#_Toc370203298)

[7.2. Glosario 135](#_Toc370203299)

[**Anejo I** **Proyecto Fotogramétrico 137**](#_Toc370203300)

[AI.1 Orientación Externa en sistema ENUG 137](#_Toc370203301)

[AI.2 Puntos de apoyo obtenidos por topografía 138](#_Toc370203302)

[AI.3 Puntos de apoyo obtenidos por fotogrametría 139](#_Toc370203303)

[AI.4 Convergencia de ejes y distancia 140](#_Toc370203304)

[AI.5 Parámetros internos calibrados de sensores ópticos 140](#_Toc370203305)

[AI.6 Parámetros calibrados del sistema fotogramétrico GNSS/INS 142](#_Toc370203306)

[**Anejo II** **Parámetros de orientación externa de sensores ópticos 144**](#_Toc370203307)

[AII.1 Datos necesarios para la georreferenciación de la zona de estudio 144](#_Toc370203308)

[AII.2 Georreferenciación directa sin constreñimientos 144](#_Toc370203309)

[AII.3 Georreferenciación directa con constreñimientos 146](#_Toc370203310)

[**Anejo III** **Listado de publicaciones relacionadas con esta Tesis 148**](#_Toc370203311)