

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO

Colegio de Postgrados

Cálculo del número de puntos GPS para la corrección geométrica y generación de una ortoimagen de alta resolución en áreas de baja y mediana pendiente

Eduardo Patricio Kirby Powney

Tesis de grado presentada como requisito para la obtención del título de Magíster en Sistemas de Información Geográfica.

Quito, Mayo de 2012

**Universidad San Francisco De Quito
Colegio de Postgrados**

HOJA DE APROBACIÓN DE TESIS

**Cálculo del número de puntos GPS para la corrección geométrica y
generación de una ortoimagen de alta resolución en áreas de baja y
mediana pendiente**

Eduardo Patricio Kirby Powney

Richard Resl. MSc.,

Director de Tesis

Director del Programa de Maestría en
Sistemas de Información Geográfica

Pablo Cabrera. MSc.,

Miembro del Comité de Tesis

Stella de la Torre, Ph.D.,

Decana del Colegio de
Ciencias Biológicas y Ambientales

Víctor Viteri Breedy, Ph.D.,

Decano del Colegio de Postgrados

Quito, Mayo de 2012

© Derechos de Autor
Eduardo Patricio Kirby Powney
2012

DEDICATORIA

“El que persevera, alcanza”

- A mis cuatro diamantes:
 - A mi mami Gladys, la persona que me dio la vida, educó, me ha dado su amor incondicional siempre; ella continuamente está pendiente de mí y me ha apoyado en todo sentido.
 - A Stephy, mi esposa, mi camarada de estudios; ella ha trajinado conmigo en la realización de esta maestría, y no sólo ha hecho eso, mientras estudiaba atendía las responsabilidades del hogar, especialmente con el cuidado de nuestras hijas. Ella es mi principal colaboradora, mi coautora.
 - A María Paz, mi primer retoño, princesita, estudiábamos juntos cuando comencé el postgrado, manteniendo siempre su simpatía, chistes, preguntas, etc., que me distraían y me impulsaban para seguir con el mismo entusiasmo a la hora de trabajar.
 - A Ana Martina, quien aun no nacía cuando emprendí este desafío y que ahora tiene un poco más de un año al finalizar. La princesa más chiquita quien con sus murmullos, palabritas, etc., está pendiente cuando llega su papi, y con una sonrisa disipa la tensión del llegar del trabajo y luego continuar con la tesis.
- A mi papi, él ya no está como persona aquí, pero su amor, formación, su espíritu jamás se han alejado de mí. Por haber sido un luchador abnegado, tan dedicado y preocupado por el bienestar de la familia.
- Al tío Lalo, un ser muy especial, mi segundo papá, mi amigo. Él está ahí cuando le necesito, entregándome su sabiduría. Poco a poco me preparó para afrontar mis estudios iniciales de pregrado, mis nuevos anhelos, mi matrimonio, etc., recordando que en su casa comenzó este propósito.
- A mis hermanos que están en el cielo, Rocío y Dayal. Se que ellos desde donde están, me cuidan y también a mi familia. Les extraño.

AGRADECIMIENTOS

- A Dios, por ser el padre supremo, quien ama y permite, quien ha decidido que hoy gane esta prueba.
- A mis hermanos: Miriam, Jhonny y Katiana, ahí están, un poquito lejos, orando por mí y mi familia, constantemente motivándome para que siga adelante, diciéndome que luche para alcanzar mis ideales, y que ahora cosechan esta meta, que es nuestro logro.
- A mis tías y tíos, apoyándome con consejos de cómo ser una mejor persona. Un tiempo vivimos juntos, haciendo ellos las veces de mis padres, ahora les agradezco por la siembra realizada.
- A Argentina y Fabián, mis suegros, personas generosas y de gran corazón; cuidaron de María Paz cuando hice mi tesis de ingeniería y ahora para mi maestría, con una dedicación total a Ana Martina; de igual forma a mis cuñados, por ser partícipes del cuidado de mis princesas.
- A la Universidad San Francisco de Quito, al programa UNIGIS, a la Universidad de Salzburgo y al personal que dirige el pensum de la maestría, por la formación académica impartida.
- Al Centro de Levantamientos Integrados de los Recursos Naturales por Sensores Remotos (CLIRSEN), por los insumos entregados y experiencia compartida.
- A Richard Resl, Director del programa de maestría y a Leo, Pablito y Karl, quienes a más de ser mis tutores, cuando necesite me dieron un empujón.
- Al Dr. Oswaldo Padilla, Dr. Alfonso Tierra, Ing. Lino Verduga, Ing. Iván Medina, Ing. Francisco León e Ing. Marco Luna, profesionales geógrafos, compañeros, profesores y amigos, pues cuando necesité de sus conocimientos, me brindaron su tiempo y experiencia.
- Al Ing. Patricio Zurita, Ing. Pablo Pérez, Ing. Santiago Rojas e Ing. José Duque, amigos que en ciertos momentos, me guiaron con ideas, software, etc., para el desarrollo de los estudios.
- A mi prima Irma Elisa, a Elisa Lalama y Fabián Echeverría, fueron en instantes, un gran apoyo al momento de la adquisición de datos GNSS.
- A Carlitos, el duro de los equipos, ahí ha estado para preparar y entregarme los insumos necesarios para la adquisición de datos de campo.
- Al Ing. Iván Pazmiño y a su empresa Instrumental & Óptica, por su soporte en la investigación, me colaboraron con datos de su Estación de Monitoreo Continuo, y pusieron a las ordenes equipos, diciéndome “cuando necesite...”.

RESUMEN

Es de interés para en las Tecnologías de Sistemas de Información Geográficas (TIG) georeferenciar la información. Para ello, se necesitan de Puntos de Control en Tierra (por sus siglas en inglés GCP) y una de las incógnitas es ¿Cuántos puntos se necesitan?. Existen a nivel mundial estudios e investigaciones que determinan una cantidad aproximada de puntos de apoyo (GCP) o Global Positioning System (GPS) para la corrección geométrica de imágenes satelitales, en las cuales se sugiere que se debe utilizar un polinomio de segundo orden con un total de 18 a 24 puntos de apoyo; otros textos sugieren como mínimo 6 GCP y en base a pruebas realizadas en el Ecuador los resultados difieren de los sugeridos y no existen estudios específicos para un área determinada y tipo de sensor que comprueben tal generalización.

Por otro lado, no solo los modelos matemáticos son un factor relevante a la hora de georeferenciar, hay que tener en cuenta otras condiciones como por ejemplo la geomorfología del terreno. Siendo el Ecuador un país extraordinariamente complejo con superficies irregulares y diferentes accidentes físicos, se presentan errores al momento de la toma de datos GPS en campo (GCP), en el instante del marcado de éstos en la imagen y condiciones exógenas en la adquisición que pueden degradar la calidad y la precisión de las imágenes de satélite a rectificarse.

En base a las observaciones presentadas, se ha propuesto para este estudio, el cálculo del número de puntos GPS para la corrección geométrica y generación de una ortoimagen de alta resolución en áreas de baja y mediana pendiente. En ese sentido, se propone tomar en campo datos GPS para valorar la consistencia espacial de cartografías para escala 1:1.000 y 1:5.000 y con ello, utilizar dichas cartografías o una de ellas como referencia para extraer de ahí los n insumos GCP para el ajuste de una imagen QuicBird.

Para la corrección geométrica, se utilizó el método de ajuste por polinomios de orden dos y se realizaron pruebas con 7, 9, 21, 30 y 42 GCP en un área de 1 Km²., los resultados obtenidos indican que en pendiente baja con 21 GCP, la imagen tiene una buena consistencia espacial respecto a la cartografía para escala 1:5.000; mientras que en pendiente media, que incluye áreas con pendiente alta y alta excesiva, no existe con ese número de puntos e inclusive con 60 GCP, un buen ajuste de la imagen corregida.

Para la generación de las ortoimágenes, se utilizó el método Monoscópico, en el cual la ortorectificación se realiza correspondiendo puntos de la imagen con un Modelo Digital de Elevaciones (MDE); se efectuaron pruebas con igual cantidad de puntos que en el método de ajuste por polinomios y entre sus resultados para áreas de pendiente baja, con 21 GCP es suficiente un buen ajuste; mientras que para la zona de pendiente media, se observa que en un rango de 30 a 40 GCP la imagen visualmente se ajusta, aunque en las zonas de pendiente alta, todavía existen diferencias que con 60 GCP no pudieron ser resueltas.

Finalmente, al incorporar un MDE en las correcciones, se observa en las imágenes rectificadas mejores ajustes que con el método de polinomios, sin dejar de resaltar que con un polinomio de orden 2 y 21 GCP para pendiente baja, los resultados son similares; y con ello, en base a este estudio, el usuario de esta tecnología pueda tomar decisiones en futuros proyectos de beneficio para el país.

ABSTRACT

It is interesting within the Technology information Geographic Systems (TIG) georeferencing information, this requires Ground Control Points (GCP) and one of the questions is: how many points are required? There are studies and researches all around the world which determine an approximate amount of control points (GCP) or Global Positioning System (GPS) for the geometric correction of satellite images, where it is recommended to use a second order polynomial with a total of 18 to 24 points of support; other texts suggest at least a minimum of 6 GCP and based on tests made in Ecuador, the results differ from those suggested and there are not specific studies for a determined area and sensor type that prove that generalization.

On the other hand, not only the mathematical models are relevant factors when georeferencing, it is required to take into account other conditions as the geomorphology of the land. Being Ecuador such an extraordinary complex country with irregular surfaces and different physical accidents; thus there are errors when taking the GPS data in campus (GCP), at the time of marking them in the image and exogenous conditions on the acquisition that can degrade the quality and accuracy of the satellite images to be rectify.

Based on the comments, it has been suggested for the study to calculate the number of points GPS for the geometric correction and the generation of a high quality orthoimage in areas of low and medium-slope. In this sense, it is proposed to take data field GPS to value the space consistency of cartography at scale 1:1.000 and 1:5000 and with them, to use the cartography mentioned or one of them as reference to extract the inputs GCP to adjust one image QuicBird.

For the geometric correction, it was used the adjustment method for polynomials of second order and we made some tests with 7, 9, 21, 30 and 42 GCP in an area of 1 Km², the results indicate that in low slope with 21 GCP, the image has a good spatial consistency in reference to the 1:5000 mapping scale; while in a medium slope, which include areas with high and too high pending, there is not that number of points and even with 60 GCP, a good fit of the corrected image.

It was used the Monoscopic Method for the generation of the orthoimage, in which, the orthorectification is made by corresponding points of the image with an Digital Elevation Model DEM, there were tests made with same quality points that in the adjustment method for polynomials and within their results for the low slope areas, with 21 GCP, a good adjustment is enough; while for the medium slope areas of 1Km²., we can observe that in a range of 30 to 40 GCP, the image is adjusted visually, although in areas of high slope, there are still differences that can not be resolved with 60 GCP.

Finally, by incorporating a DEM in the corrections, we can see better adjustments in the rectified images than in the polynomial method, highlighting that with a 2 and 21 polynomial order GCP for low slope, the results are similar; and with them, base on this study, the user of this technology can take decisions for future and professional projects, and for the benefit of the country.

TABLA DE CONTENIDOS

AGRADECIMIENTOS.....	v
RESUMEN.....	vi
ABSTRACT.....	vii
ÍNDICE DE TABLAS.....	x
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	x
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xi
CAPÍTULO 1.....	1
INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.....	1
1.1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.2. OBJETIVOS.....	2
1.2.1. Objetivo General.....	2
1.2.2. Objetivos Específicos.....	2
CAPÍTULO 2.....	4
MARCO TEÓRICO.....	4
2.1. INTRODUCCIÓN A LA TELEDETECCIÓN.....	4
2.2. DEFINICIÓN DE TELEDETECCIÓN.....	4
2.3. CORRECCIONES GEOMÉTRICAS DE IMÁGENES.....	5
2.3.1. Cálculo del modelo de deformación.....	6
2.3.2. Corrección Geométrica.....	7
2.4. NÚMERO Y DISTRIBUCIÓN DE LOS PUNTOS DE CONTROL.....	8
2.5. ORTOIMAGENES.....	8
2.6. EL SATÉLITE QUICKBIRD.....	10
2.7. MODELO DIGITAL DE ELEVACIONES (DEM o MDE o DTM).....	11
2.8. PENDIENTE.....	11
2.9. ESTADÍSTICOS.....	14
2.9.1. La Media Aritmética.....	14
2.9.2. El Rango.....	14
2.9.3. Desviación Estándar o Típica:.....	15
2.9.4. Varianza.....	15
2.10. DISTRIBUCIÓN NORMAL.....	15
2.11. TEORÍA DEL MUESTREO.....	16
2.12. ERROR TÍPICO.....	16
2.13. INTERVALOS DE CONFIANZA PARA MEDIAS.....	17
2.14. TEORÍA DE PEQUEÑAS MUESTRAS.....	18
2.15. HIPÓTESIS ESTADÍSTICAS.....	18
2.15.1. Grados de Libertad:.....	18
CAPÍTULO 3.....	19
METODOLOGÍA.....	19
3.1 ÁREA DE ESTUDIO PRELIMINAR.....	20
3.2 SISTEMA DE REFERENCIA.....	21
3.3 SISTEMA CARTOGRÁFICO DE REPRESENTACIÓN.....	22
3.4 RECOPIACIÓN DE LA INFORMACIÓN.....	22
3.5 ADQUISICIÓN DE DATOS GNSS - GPS.....	23
3.5.1 Planificación de campo.....	23
3.5.2 Recursos para la toma de los datos GNSS.....	24
3.5.3 Determinación de los puntos GNSS – GPS en campo.....	25
3.5.4 Procesamiento de los Datos GPS (Postproceso).....	27

3.6	REVISIÓN DE LA INFORMACIÓN EXISTENTE	28
3.6.1	Evaluación de la imagen.....	28
3.6.2	Evaluación de la cartografía planimétrica	29
3.6.3	Revisión de de las curvas de nivel.-	31
3.6.4	Revisión del Suttle Radar Topography Mission.....	34
3.7	GENERACIÓN Y REVISIÓN DEL MDE _{CURVAS}	34
3.8	GENERACIÓN DEL MAPA DE PENDIENTES	37
3.9	DETERMINACIÓN DEL ÁREA DEFINITIVA DE ESTUDIO	39
3.10	CG Y ESTIMACIÓN DEL NÚMERO DE GCP	40
3.10.1	CG y estimación del número de GCP en pendiente baja.....	41
3.10.2	CG y estimación del número de GCP en pendiente media.....	45
3.11	CONSISTENCIA ESPACIAL DE LAS IMÁGENES POR CG	46
3.12	CÁLCULO DEL NIVEL DE CONFIANZA.	48
3.13	ORTOIMÁGENES Y ESTIMACIÓN DEL NÚMERO DE GCP.....	49
3.14	CONSISTENCIA ESPACIAL DE LAS ORTOIMÁGENES.....	54
3.15	NIVEL DE CONFIANZA PARA LAS ORTOIMÁGENES	55
CAPÍTULO 4		56
RESULTADOS		56
4.1.	RESULTADOS DE LOS PUNTOS GPS POSTPROCESADOS.....	56
4.2.	RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN EN LA IMAGEN.....	58
4.3.	RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN DE LA CARTOGRAFÍA	59
4.4.	RESULTADOS DE LA VALIDACIÓN DE CURVAS DE NIVEL	63
4.5.	RESULTADOS Y REVISIÓN DEL MDE _{CURVAS}	64
4.6.	RESULTADOS DEL MAPA DE PENDIENTES	66
4.7.	RESULTADOS DEL ÁREA DE ESTUDIO DEFINITIVA	67
4.8.	RESULTADOS DE LA CG EN PENDIENTE BAJA.....	67
4.9.	RESULTADOS DE LA CG EN PENDIENTE MEDIA	72
4.10.	RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN DE LAS IMÁGENES POR CG	76
4.11.	RESULTADOS DEL NC PARA LAS IMÁGENES CON CG.....	78
4.12.	RESULTADOS DE LAS ORTOIMÁGENES PARA PB	78
4.13.	RESULTADOS DE LAS ORTOIMÁGENES PARA PM	80
4.14.	RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN DE ORTOIMÁGENES	81
4.15.	RESULTADOS DEL NC EN LAS ORTOIMÁGENES	83
CAPÍTULO 5		84
DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS		84
CAPÍTULO 6		88
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		88
6.1.	CONCLUSIONES.....	88
6.2.	RECOMENDACIONES	89
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		91

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Clasificación inglesa de pendientes.....	13
Tabla 3.1. Características de la imagen QuickBird – zona preliminar de estudio.....	28
Tabla 4.1. Elenco de coordenadas GNSS – GPS.....	57
Tabla 4.2. Diferencias de altura de los DEM del área de estudio preliminar.....	65
Tabla 4.3. Error cuadrático medio de las correcciones geométricas en pendiente baja	68
Tabla 4.4. Ejemplo 1, comparación de la imagen de pendiente baja con la cartografía	69
Tabla 4.5. Ejemplo 2, comparación de la imagen de pendiente baja con la cartografía	71
Tabla 4.6. Error cuadrático medio de las correcciones geométricas en pendiente media ..	73
Tabla 4.8. Ejemplo 2, comparación de la imagen de pendiente media con la cartografía .	75
Tabla 4.9. Resultados de la consistencia espacial de las imágenes en pendiente baja	76
Tabla 4.10. Resultados de la consistencia espacial de las imágenes en pendiente media...	77
Tabla 4.11. Niveles de confianza para la muestra de las imágenes en pendiente baja.....	78
Tabla 4.12. Niveles de confianza para la muestra de las imágenes en pendiente media.....	78
Tabla 4.13. Comparación de las ortoimágenes vs. la cartografía para pendiente baja.....	79
Tabla 4.14. Comparación de las ortoimágenes vs. la cartografía para pendiente media....	80
Tabla 4.15. Resultados de la consistencia espacial de las ortoimágenes en pendiente baja	81
Tabla 4.16. Resultados de la consistencia espacial de las ortoimágenes en pendiente media	82
Tabla 4.17. Niveles de confianza para la muestra de las ortoimágenes en pendiente baja .	83
Tabla 4.18. Niveles de confianza para la muestra de las ortoimágenes en pendiente media	83

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 3.1. Proceso metodológico para conseguir los objetivos de la tesis.....	19
Gráfico 4.1. Error Cuadrático Medio vs. los Puntos de Control en pendiente baja	68
Gráfico 4.1. Error Cuadrático Medio vs. los Puntos de Control en pendiente baja	73

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Procedimiento para generar una Ortoimagen.....	10
Figura 2.2. Cálculo de la pendiente	14
Figura 2.3. Distribución Normal Estándar.....	16
Figura 3.1. Área de Estudio Preliminar	21
Figura 3.2. Distribución de los puntos GNSS en el área de estudio.....	24
Figura 3.3. Muestras de toma de puntos de apoyo GNSS – GPS.....	26
Figura 3.4. Procesamiento de la Base “Estadio”	27
Figura 3.5. Procesamiento de líneas base	27
Figura 3.6. Herramienta de análisis espacial para cálculo de distancia entre dos puntos. .	29
Figura 3.7. Uso de la herramienta Near e ingreso de parámetros.....	30
Figura 3.8. Prueba t – Student, cola derecha y representación del nivel de confianza.....	30
Figura 3.9. Generación de la Topología	33
Figura 3.10. Corrección de la topología	34
Figura 3.11. Ingreso de parámetros para generar un MDE en ERDAS.....	35
Figura 3.12. Coordenadas leídas para generar un MDE en ERDAS.....	36
Figura 3.13. Herramienta para la extracción de valores de alturas en un Raster.....	37
Figura 3.14. Parámetros de ingreso para extraer el valor de la altura en un Raster	37
Figura 3.15. Herramienta y parámetros para la generación de un mapa de pendientes	38
Figura 3.16. Clasificación automática de clases del mapa de pendientes.	38
Figura 3.17. Clases reclasificadas de pendiente.	39
Figura 3.18. Áreas de estudio para pendiente baja y media.	40
Figura 3.19. Selección del modelo geométrico de corrección y fuente de referencia.	41
Figura 3.20. Entorno de trabajo ERDAS para la corrección geométrica.	42
Figura 3.21. Selección del modelo geométrico de corrección y fuente de referencia.	43
Figura 3.22. Ingreso de GCP en la imagen a corregir y en la cartografía de referencia.....	44
Figura 3.23. Coordenadas (GCP) de la primera prueba, residuales y estadísticos.....	44
Figura 3.24. RMS de la primera prueba con el cambio de distribución de GCP	45
Figura 3.25. Parámetros finales para la corrección geométrica de la imagen (resample) ...	45
Figura 3.26. Proceso de corrección de la imagen en pendiente media con 42 GCP	46
Figura 3.27. Puntos muestra de referencia para la evaluación de las imágenes generadas. 47	
Figura 3.28. Muestra de puntos marcados en la imagen y cartografía de referencia	47
Figura 3.29. Herramienta y parámetros de ingreso para la comparación de distancia	48
Figura 3.30. LPS Project Manager	50
Figura 3.31. Imagen de entrada y diagrama de procesos para la ortorectificación	50
Figura 3.32. Orientación interior y creación de los parámetros para el sensor QuickBird .	51
Figura 3.33. Entorno de trabajo para el marcado de puntos LPS	51
Figura 3.34. Descripción del entorno Point Measurement	52
Figura 3.35. Importación de coordenadas de referencia al entorno Point Measurement	52
Figura 3.36. Marcación de los puntos para la ortorectificación	53
Figura 3.37. Prueba de convergencia en la Aerotriangulación.....	53
Figura 3.38. Parámetros de ingreso para etapa final de la ortorectificación de la imagen..	54
Figura 3.39. Creación de los insumos para la evaluación estadística de las ortorectificaciones. 55	
Figura 4.1. Postproceso líneas base – vectores calculados.....	56
Figura 4.2. Postproceso de líneas base – coordenadas y precisiones.	57
Figura 4.3. Desplazamiento visual de la imagen respecto a los puntos GPS calculados ...	58
Figura 4.4. Desplazamiento geométrico de la imagen respecto a los puntos GPS.....	59

Figura 4.5. Diferencia visual de los elementos existentes en las cartografías recopiladas.	60
Figura 4.6. Comparación de la cartografía 1:1.000 vs. los puntos GPS de campo	61
Figura 4.7. Comparación de la cartografía 1:5.000 vs. los puntos GPS de campo	62
Figura 4.8. Errores topológicos de las curvas de nivel.....	64
Figura 4.9. Modelo Digital de Elevaciones generado con curvas de nivel cada 5m.....	64
Figura 4.10. Pendientes del área de estudio preliminar	66
Figura 4.11. Áreas de estudio, pendiente baja y media	67
Figura 5.1. Comparación de los resultados de pendiente baja para los dos métodos.....	86

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1. INTRODUCCIÓN

La Teledetección como una de las tecnologías de la información geográfica es una herramienta para visualizar y cartografiar determinadas variables como por ejemplo: contenido de clorofila, uso y cobertura del suelo, agricultura de precisión, temperatura del agua del mar, etc. En ese sentido, las imágenes de satélite ofrecen grandes posibilidades para la actualización de cartografía en comparación a los métodos tradicionales que se han venido y se siguen utilizando, al ofrecer adquisiciones sistemáticas y en condiciones similares de observación, permitiendo obtener una visión actualizada de la superficie que se observa, así como seguir la evolución temporal de determinados fenómenos muy dinámicos, como el crecimiento urbano, estado de cultivos, inundaciones, etc.

Con la incorporación de satélites de alta resolución, han aumentado los campos de estudio de la teledetección que venía investigando los recursos forestales, agrarios, los sistemas de prevención de incendios forestales, etc., actualmente su campo de aplicación va desde el inventario de los recursos naturales hasta el control y la gestión de estudios catastrales en cuanto a la planificación de la geoinformación. Para realizar es tipo de estudios, se dispone en el mercado de diferentes sensores, los mismos que cuentan con distintos productos, resoluciones, temporalidad, extensión, niveles de corrección y transformación.

Dentro de este contexto, las correcciones y transformaciones matemáticas que se realizan a las imágenes de satélite son muy importantes y consecuentemente existen otros factores como la extensión que cubre la imagen, el relieve, la pendiente, el desnivel, la elevación del sol, el ruido, la calidad de los datos obtenidos del Sistema de Posicionamiento Global (GPS), el marcado de los puntos en la imagen, etc. que pueden influir en la calidad de las imágenes capturadas y procesadas.

Existen publicaciones a nivel mundial que sugieren para la georeferenciación de imágenes satelitales utilizar modelos de deformaciones matemáticos con polinomios de orden dos con un mínimo de 6 puntos de apoyo terrestre (por sus siglas en inglés GCP) y otros, con promedio 18 a 24 GCP, etc. Experiencias revisadas en el Ecuador presentan observaciones al aplicar las sugerencias mencionadas. Debido a la importancia del tema, en este estudio se presentará una metodología centrada en el campo de la ortorectificación y del número de punto de apoyo GCP necesarios para corrección de una imagen QuickBird en una escena de 1 Km² para zonas de pendiente baja y media. Se utilizará para ello, los modelos clásicos de corrección geométrica por deformación de polinomios y el método monoscópico para la generación de ortoimágenes a través de un modelo digital de elevaciones (DEM).

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo General

Determinar el número de puntos GPS para la corrección geométrica y generación de una ortoimagen de alta resolución en áreas de baja y mediana pendiente.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Validar a través de una muestra aleatoria la información de referencia con la finalidad de utilizar esta referencia en el proceso de rectificación de las imágenes.
- Generar un modelo digital de elevaciones a partir de curvas de nivel de cartografía para escala 1:5.000 o mayores.
- Valorar el área preeliminar de estudio y su relieve en función de la información recopilada y de un modelo de pendientes, para de esta manera determinar las áreas de estudio definitivas que incluyan un área de pendiente baja y otra de pendiente media.
- Corregir las imágenes de estudio a partir de un polinomio de orden dos haciendo pruebas con diferentes cantidades de puntos de apoyo.
- Generar ortoimágenes para la zona de pendiente baja y otras para pendiente media con diferente cantidad de puntos de apoyo.

- Evaluar los resultados de la corrección geométrica y generación de ortoimágenes mediante una fuente de igual o mayor precisión
- Determinar el número ideal de puntos de apoyo con un nivel de confianza para corrección y generación de ortoimágenes en zonas de baja y alta pendiente.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

2.1. INTRODUCCIÓN A LA TELEDETECCIÓN

El sistema ideal o perfecto de Teledetección no existe, los scanner de barrido están “detectando” información durante un intervalo finito de tiempo en el cual el satélite y la Tierra están en continuo movimiento. Por otro lado, el terreno es extraordinariamente complejo con superficies irregulares, incluso en las imágenes aéreas aparentemente “planas” se producen distorsiones debidas a la curvatura terrestre y al sensor utilizado. Consecuentemente existen errores que se introducen en el proceso de adquisición de datos que pueden degradar la calidad y la precisión de las imágenes de satélite. Estos errores afectan a la geometría de la imagen y al valor radiométrico de los píxeles. Por lo tanto es absolutamente necesario un “procesamiento “de las imágenes que corrija las distorsiones, degradaciones y los “ruidos” introducidos durante el proceso de toma de los datos. (Del Bosque, 2004).

En Teledetección, no obstante, la forma más habitual de clasificar a los errores con que vienen afectadas las imágenes es considerando si inciden en la geometría o en la radiometría de las mismas.

2.2. DEFINICIÓN DE TELEDETECCIÓN

Se define a la Teledetección espacial o percepción remota, como aquella técnica que permite adquirir imágenes de la superficie terrestre desde sensores instalados en plataformas espaciales y de su transformación en información útil. El fundamento principal es la detección y grabación de la energía electromagnética procedente de los objetos, ya por emisión propia, ya por reflejar la energía del sol o la enviada por un haz energético artificial. Esta energía es registrada en valores digitales, a partir de las cuales se reconstruyen las imágenes. (Del Bosque, 2004)

La teledetección es una herramienta muy apropiada para cartografiar determinadas variables: temperatura del agua del mar, contenido en clorofila, cobertura de nieve, ocupación del suelo, etc., y la lista se está continuamente ampliando ante la disponibilidad de nuevos sensores con mayor resolución espacial, espectral o temporal.

También es una alternativa idónea para la generación de bases de datos globales, ya que se trata de un medio de observación que cubre casi todo el planeta, con el mismo o similar sensor y a intervalos regulares.

La Teledetección también puede resultar una alternativa en lugares donde no existe cartografía o cuando ésta sea muy heterogénea o esté sólo disponible en forma analógica que sea preciso digitalizar, esta información es muy costosa de integrar en un SIG, mientras que las imágenes al tratarse de información digital se integran con relativa facilidad. (Del Bosque, 2004).

2.3. CORRECCIONES GEOMÉTRICAS DE IMÁGENES

A continuación vamos a detallar este proceso. Se explicará el proceso “clásico”, el más habitual hasta hace poco tiempo y que se sigue utilizando mucho todavía debido a su sencillez, habitualmente llamado “corrección polinomial”.

La corrección geométrica de una imagen es la creación de una nueva imagen que conserva los valores radiométricos de la original, pero se le ha aplicado una deformación para adaptarla a una Referencia elegida por nosotros (Villa, 2008)

Según Arozerena (2004), el objetivo es el de modificar la geometría de los píxeles, ajustándolos normalmente a un sistema dado (proyección cartográfica y escala dada), manteniendo de forma más significativa la radiometría de la imagen original.

El proceso de corrección geométrica cartográfica conlleva el estudio de las siguientes fases:

- **Estudio del modelo de deformación** de la imagen según ecuaciones matemáticas que relacionan las coordenadas de la imagen digital (fila y columna) con las coordenadas de referencia cartográficas (X, Y o longitud (λ) y latitud (ϕ)). Es posible, asimismo, introducir en dichas correcciones el efecto de la altitud del punto de acuerdo a modelos que contemplen dicho parámetro. Para ello, se hace necesario el disponer previamente de Modelos Digitales de Elevación (MDE) del territorio.
- **Corrección geométrica**, donde se llevará a cabo la propia transformación geométrica de todos los píxeles y la creación de la nueva imagen digital por asignación del nuevo valor radiométrico correspondiente.

2.3.1. Cálculo del modelo de deformación.

Los sistemas más empleados se pueden dividir en tres grupos:

- **Ajustes por métodos polinomiales.**- El método consiste en el cálculo de los coeficientes de un polinomio (normalmente de segundo grado), mediante el conocimiento de coordenadas del terreno (x, y) – Puntos de Control sobre el Terreno (PCT) - en un Sistema Geodésico y Proyección Cartográfica dada y de su homólogo en la imagen (u, v) fila y columna.

Las ecuaciones serían:

$$u = a_0 + a_1x + a_2y + a_3xy + a_4x^2 + a_5y^2 \quad (\text{ecuación. 2.1})$$

$$v = b_0 + b_1x + b_2y + b_3xy + b_4x^2 + b_5y^2 \quad (\text{ecuación. 2.2})$$

El cálculo, al haber más ecuaciones que incógnitas, se resuelve por mínimos cuadrados. Normalmente, no se emplea el ajuste mediante un polinomio de primer grado, ya que ello sería una simple ecuación lineal de transformación. Polinomios mayores de segundo grado pueden introducir más deformaciones no semejantes a la topografía original del territorio,

necesitándose además un número elevado de puntos de control para la resolución de los mismos (normalmente se necesitan unos 3 Ground Control Point (GCP) por el número de coeficientes del polinomio, distribuidos por la imagen de forma consistente).

- **Modelización Paramétrica.**- el problema consiste en resolver, con las ecuaciones anteriormente descritas (ec.2.1 y 2.2), el cálculo de dichas 6 incógnitas por cada toma (12 incógnitas para el caso de un modelo estereoscópico espacial).

Para imágenes procedentes de barredores multiespectrales, se necesita el estudio del modelo físico de deformación píxel a píxel originado en el proceso de captura. Para efectuar una adecuada modelización se necesita conocer además el Modelo Digital de Elevación. En este caso, el modelo matemático es más complejo (conocimiento de la posición, actitud y sistema de barrido), pero su ejecución posterior es mucho más simple, al necesitar un menor número de puntos de apoyo (GCP) por escena.

- **Cálculo Dinámico.**- Se realiza de forma instantánea y sincronizada con la captura, la posición mediante la incorporación de Sistemas de Posicionamiento Global (GNSS/GPS) y el comportamiento del sensor, incorporados conjuntamente en los propios sistemas de captura (plataforma/sensor).

2.3.2. Corrección Geométrica

Esta corrección es realizada en dos etapas:

- Transformación de todos los píxeles de la imagen según los modelos de deformación elegidos (cálculo de coordenadas de la nueva imagen transformada).
- Asignación de la adecuada radiometría a cada píxel corregido anteriormente. Esto implica una nueva posición de los mismos y, por lo tanto, una necesaria asignación del valor radiométrico más próximo al que tenía previamente (interpolación del valor radiométrico por los métodos: Vecino más cercano, Bilinear o Convulación Cúbica).

2.4. NÚMERO Y DISTRIBUCIÓN DE LOS PUNTOS DE CONTROL

Según Villa (2008), basta decir que el mínimo número de puntos de apoyo, por consideraciones puramente matemáticas, es de 3 a 4 veces el número de coeficientes a determinar en cada uno de los polinomios. (Ej. Grado 2, con 6 coeficientes: requiere de 18 a 24 puntos). Además, hay que considerar el tamaño de la imagen y la magnitud de la distorsión que queremos modelizar.

En cuanto a la distribución, es lógico pensar que deben cubrir toda la imagen, y estar más o menos regularmente distribuidos para no "sesgar" el ajuste del polinomio hacia una zona. Hay que prestar especial atención a los bordes, para evitar una excesiva extrapolación, y además porque es la zona donde se suelen producir las uniones en los posibles "mosaicos" con otras imágenes. Es muy conveniente introducir siempre uno o varios puntos en aquellos detalles que sean muy visibles (como por ejemplo en cruces viales, canchas, casas, etc.), ya que es donde se vería más claramente a posteriori cualquier posible desviación producida por la propia "flexibilidad" del polinomio.

Por otra parte, no es conveniente situar puntos de control en zonas muy elevadas respecto a la altitud media de la zona de la imagen, como puertos, cumbres de montañas, etc. Esto es debido a que, al no tener en cuenta este método las diferencias de altitud, estos puntos "extremos" introducen unas "tensiones" en el polinomio que afectan negativamente a su precisión en la generalidad de la imagen.

2.5. ORTOIMAGENES

Uno de los inconvenientes de las correcciones geométricas realizadas mediante la modelización polinomial que acabamos de describir es que no tiene en cuenta los desniveles del terreno, y por tanto las imágenes resultantes conservan unas "deformaciones" debidas a estos desniveles.

Estas deformaciones suelen ser poco importantes (de unos 2 ó 3 píxeles en los casos más habituales con un relieve plano) en el caso de satélites, como el Landsat, que tienen

siempre una dirección de toma de vista vertical, pero pueden ser muy grandes en satélites, como el SPOT, que tienen la posibilidad de "inclinarse" la dirección de toma hasta unos 23°. (Villa, 2008)

Existen algunas definiciones que conceptualizan lo que es una ortoimagen, algunas la relacionan con el proceso de georeferenciación (relacionar geoméricamente a cada píxel de la imagen con el punto de superficie terrestre a que corresponde) y otras, en que la ortoimagen es un producto de cartografía topográfica, en donde se representa el terreno mediante imágenes aéreas o de satélite.

Entre algunas de las más destacadas definiciones tenemos:

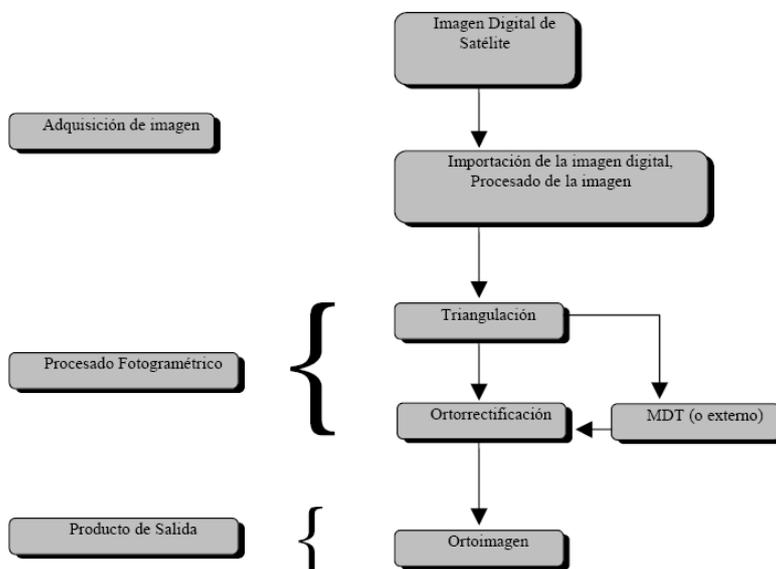
- Una vez georeferenciada, a la imagen se le suele llamar "ortoimagen" (Villa G., 2008)
- Una ortoimagen es una imagen digital que ha sido procesada para corregir desplazamientos debido a la perspectiva del sensor y al relieve.¹
- Una ortoimagen es una imagen digital que ha sido ortorectificada (incluye corrección del sensor y relieve). La ortorectificación puede ser generada mediante dos métodos: el Monoscópico, que utiliza una imagen 2D y un modelo digital de elevación 1D (MDE) y el Estereoscópico², que utiliza un par estéreo 2D+2D

Para esta investigación, se utilizó el método Monoscópico, en el cual la ortorectificación se realiza correspondiendo puntos de la imagen con un MDE. El resultado de este proceso es una imagen digital planiméricamente corregida que tiene una proyección ortogonal y se puede sobreponer sobre un mapa u otros datos georeferenciados. Para resumir dicho proceso, es conveniente citar el procesado de imágenes presentado por Peces (2006) en la figura 2.1:

¹ <http://concurso.cnice.mec.es/cnice2006/material121/unidad3/glosario.htm>

² <http://webapp.ciat.cgiar.org/dtmradar/ortoimagenes.htm>

Figura 2.1. Procedimiento para generar una Ortoimagen



Fuente: Peces (2006).

2.6. EL SATÉLITE QUICKBIRD

QuickBird es un satélite comercial de teledetección perteneciente a la agencia espacial DigitalGlobe, el cual fue puesto en órbita en octubre de 2001. QuickBird – 2 orbita el planeta siguiendo una órbita heliosincrónica y recoge imágenes de la superficie de la Tierra durante las horas de sol. Según la Agencia Espacial Europea (2012), el sistema recoge datos pancromáticos de 61 centímetros y estereoscópicos multispectrales de 2,5 metros.

Según Sánchez (2012), estas imágenes se pueden caracterizar en:

- Basic Imagery: que es el producto más básico, el cual presenta únicamente corrección radiométrica y corrección por sensor (focal y chip, distorsiones ópticas y de barrido).
- Standar Imagery: cuenta con corrección radiométrica y una corrección geométrica preliminar, además tiene la corrección de distorsiones por posición de la órbita, altitud del sensor, rotación y distorsión panorámica.

Algunas de sus características indican que tiene una altura orbital de 450 Km., con inclinación orbital de 97.2°, cruza por el Ecuador a las 10:30 a.m., con período de revisita de 1 a 3, 5 días dependiendo de la latitud, con Swath de 16.5 Km (nadir), etc. (Villa, 2008; adaptado por Kirby, 2012)

2.7. MODELO DIGITAL DE ELEVACIONES (DEM o MDE o DTM)

Se denomina modelo digital del terreno a una estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de una variable cuantitativa y continua, como puede ser la temperatura, la cota, la densidad o la presión atmosférica, etc. En particular, cuando la variable a representar es la cota o altura del terreno se denomina Modelo Digital de Elevaciones o MDE (Kirby, 2007)

2.8. PENDIENTE

De acuerdo al MAGRAMA (n. d.), la pendiente, *en sentido estricto*, es la inclinación de un terreno respecto a un plano horizontal; esta aceptación no es la única y es muy frecuente utilizar el término pendiente en un *sentido más amplio* para describir una unidad geomorfológica compleja. Entonces según el enfoque elegido, el método de inventariación y clasificación será distinto.

El enfoque en el sentido estricto se basa en el cálculo del gradiente de pendiente para distintas áreas de estudio; según la finalidad de éste, las pendientes se agrupan en clases diversas y con la ayuda de un mapa topográfico o un modelo digital de elevaciones [..], se puede determinar la pendiente basado en las curvas de nivel.

Existen ciertos problemas al momento de realizar un análisis de pendientes como por ejemplo:

- Elegir el número de clases para el fin propuesto
- La delimitación de las áreas homogéneas

- La escala del mapa topográfico
- La equidistancia de curvas de nivel
- La resolución geométrica del modelo digital de elevaciones
- Etc.

Un número de clases grande resulta confuso de cartografiar y un número excesivamente pequeño restringe y puede generalizar [...] el interés del mapa. Así mismo, cuando la escala del mapa es más grande y menor la equidistancia entre curvas de nivel, existirá un menor error al momento de delimitar la áreas; en la práctica, es recomendable utilizar entre cuatro y ocho clases (MAGRAMA, n.d.).

A continuación, enunciaremos una serie de métodos utilizados para la realización del mapa de pendientes en función de curvas de nivel:

- Método del círculo y malla.
- Método del círculo móvil.
- Método de los intervalos móviles.
- Método cuadrícula.
- Descomposición en sectores.
- Perfiles de pendiente.
- Mediciones en el campo.

En función de las clasificaciones, existe una cantidad de propuestas, muchas de ellas con un enfoque diferente dependiente del tipo de uso que se le va a dar al territorio de estudio; por tanto, debe estar claro que las clasificaciones no pueden tener el mismo intervalo de clase para una misma actividad si el terreno es llano, ondulado o con fuertes desniveles. A modo de orientación, se citan dos de las clasificaciones más utilizadas; para actividades urbanas y para usos agrarios. En la tabla 2.1, se observa un ejemplo de esta última clasificación, basada en la clasificación inglesa de pendientes. (MAGRAMA, n.d.).

Tabla 2.1. Clasificación inglesa de pendientes.

Pendiente (en grados)	Denominación
0 a 3	Suave
3 a 7	Moderadamente pendiente
7 a 11	Fuertemente pendiente
11 a 15	Pendiente casi excesiva
16 a 25	Excesivamente pendiente
> 25	Pendiente muy excesiva

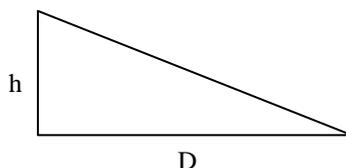
Fuente: Bibby y Mackney (1969)

Mientras que en el enfoque en sentido estricto, de hecho, es un estudio geomorfológico, desde el momento que a la pendiente se la considera como una forma sintética del relieve. Sus clasificaciones se basan en la escala de trabajo y la finalidad del estudio; y cada una de éstas varía mucho. Por ejemplo SAVIGEAR (1965), encontrado en MAGRAMA (n.d.), distingue únicamente tres tipos de pendiente: Pendiente creciente, constante y decreciente.

Para el cálculo de la pendiente basada en procesos digitales y el empleo de modelos digitales de elevaciones, la pendiente es calculada como la máxima razón de cambio de valores entre una celda y sus vecinos, pudiendo ser expresada en grados o porcentajes. Los grados son comúnmente usados en aplicaciones científicas, mientras que los porcentajes son usados en estudios de transportación (ESRI, 2010).

La pendiente basada en el porcentaje, se obtiene al dividir la diferencia de elevación entre dos puntos por la distancia entre ellos y luego este valor multiplicado por 100; y para el cálculo de la pendiente basada en grados, imagine la altura (rise) y la distancia horizontal (run) como lados de un triángulo rectángulo, por trigonometría se calcula el arco tangente del cateto opuesto por el adyacente. Ver la figura 2.2.

Figura 2.2. Cálculo de la pendiente



Fuente: Esri (2010), adaptado por Kirby (2012)

$$\text{Pendiente en porcentaje} = \frac{h}{D} \times 100 \quad (\text{ecuación 2.3})$$

$$\text{Pendiente en grados} = \arctan \frac{h}{D} \quad (\text{ecuación 2.4})$$

2.9. ESTADÍSTICOS

Existen términos importantes estadísticos que en la mayoría de libros tienen la misma definición con mayores o menores explicaciones. En ese sentido se citan en este marco teórico los descritos por Murray (1991):

2.9.1. La Media Aritmética

La media aritmética o simplemente la media, de un conjunto de N números X_1, X_2, \dots, X_N , se define por:

$$\bar{X} = \frac{X_1 + X_2 + X_3 + \dots + X_N}{N} = \frac{\sum_{j=1}^N X_j}{N} = \frac{\sum X}{N} \quad (\text{ecuación 2.5})$$

2.9.2. El Rango

El rango de un conjunto de números es la diferencia entre el mayor valor y el menor de todos ellos.

2.9.3. Desviación Estándar o Típica:

La desviación estándar o desviación típica (denotada con el símbolo σ) es una medida de centralización o dispersión para variables de razón (ratio o cociente) y de intervalo, de gran utilidad en la estadística descriptiva.

Se define como la raíz cuadrada de la varianza. Junto con este valor, la desviación típica es una medida (cuadrática) que informa de la media de distancias que tienen los datos respecto de su media aritmética, expresada en las mismas unidades que la variable.

La desviación típica de un conjunto de N números, X_1, X_2, \dots, X_N , se define por:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N (X_j - \bar{X})^2}{N}} \text{ para la población} \quad (\text{ecuación 2.6})$$

$$y \ s = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N (X_j - \bar{X})^2}{N - 1}} \text{ para la muestra} \quad (\text{ecuación 2.7})$$

2.9.4. Varianza

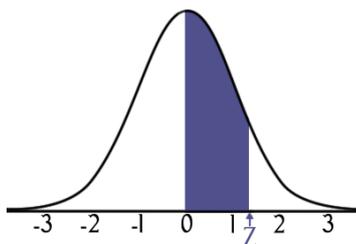
La varianza de un conjunto de datos se define como el cuadrado de la desviación típica, de modo que s^2 y σ^2 representan la varianza de la muestra y la varianza de la población, respectivamente.

2.10. DISTRIBUCIÓN NORMAL

En estadística y probabilidad se llama distribución normal, distribución de Gauss o distribución gaussiana, a una de las distribuciones de probabilidad de variable continua que con más frecuencia aparece aproximada en fenómenos reales.

La gráfica de su función de densidad tiene una forma acampanada y es simétrica respecto de un determinado parámetro. Esta curva se conoce como campana de Gauss y es el gráfico de una función gaussiana. Observe la siguiente figura 2.3.

Figura 2.3. Distribución Normal Estándar



Fuente: www.disfrutalasmaticas.com, (2012)

La importancia de esta distribución radica en que permite modelar numerosos fenómenos naturales, sociales y psicológicos.

2.11. TEORÍA DEL MUESTREO

La teoría del muestreo estudia la relación entre una población y las muestras tomadas de ella; para que las conclusiones de la teoría de muestreo y de la inferencia estadística sean válidas, las muestras deben escogerse representativas de la población y una forma de obtener una muestra representativa es mediante el muestreo aleatorio, es así que una población muy grande se puede considerar como si fuera infinita.

En el caso de una distribución de muestreo de medias, denotamos la media y la desviación típica por u_x y s_x y las de la población por u y σ

2.12. ERROR TÍPICO

La desviación típica de una distribución de muestreo de un estadístico se suele llamar su error típico.

Hay que considerar que si el tamaño de la muestra es lo bastante grande, las distribuciones de muestreo son normales o casi normales y si son menores a 30, las muestras se llaman pequeñas.

Cuando los parámetros de la población, como por ejemplo σ , son desconocidos, pueden ser estimados con precisión por sus correspondientes estadísticos muestrales, como s , si las muestras son lo suficientemente grandes; en ese sentido el error típico para la población se calcula con la siguiente ecuación:

$$\sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma}{\sqrt{N}} \quad (\text{ecuación 2.8})$$

y para la muestra:

$$s_{\bar{x}} = \frac{s}{\sqrt{N}} \quad (\text{ecuación 2.9})$$

2.13. INTERVALOS DE CONFIANZA PARA MEDIAS

Los límites de confianza para estimar la media de la población μ vienen dados por $\bar{X} \pm z_c \sigma_{\bar{x}}$, donde z_c (que depende del nivel particular de confianza deseado) se pueden leer de la tabla de Áreas bajo la curva normal canónica entre 0 y z ; estos límites de confianza están dados para la media de la población están dados por:

$$\bar{X} \pm z_c \frac{\sigma}{\sqrt{N}} \quad (\text{ecuación 2.10})$$

Generalmente, la desviación típica σ de la población no es conocida; así pues para obtener los anteriores límites de confianza se usa la estimación muestral s ; esto es satisfactorio para $N \geq 30$. Para $N < 30$, la aproximación es pobre y debe emplearse la teoría de pequeñas muestras.

2.14. TEORÍA DE PEQUEÑAS MUESTRAS.

Para muestras de tamaño menor a 30, llamadas pequeñas muestras o teoría exacta del muestreo, sus resultados son válidos tanto para pequeñas muestras como para grandes, como es el caso de la Distribución t de Student, definida por:

$$t = \frac{\bar{X} - u}{\sigma / \sqrt{N}} \quad (\text{ecuación 2.11})$$

2.15. HIPÓTESIS ESTADÍSTICAS

Al intentar alcanzar una decisión, es útil hacer hipótesis sobre la población implicada. Tales hipótesis que pueden o no ser ciertas, se llaman hipótesis estadísticas.

La *hipótesis nula* es en muchos casos formulada con el único propósito de rechazarla o invalidarla y suele ser denotada por H_0 .

La *hipótesis alternativa* es aquella hipótesis que difiere de una nula y se denota por H_1 .

Los contrastes de hipótesis y significación o reglas de decisión se extienden fácilmente a pequeñas muestras también; la única diferencia consiste en que el estadístico z queda sustituido por el estadístico t .

2.15.1. Grados de Libertad:

El número de grados de libertad de un estadístico, generalmente denotado por v , se define como el número N de observaciones independientes de la muestra (o sea el tamaño de la muestra) menos el número k de parámetros de la población. Siendo entonces:

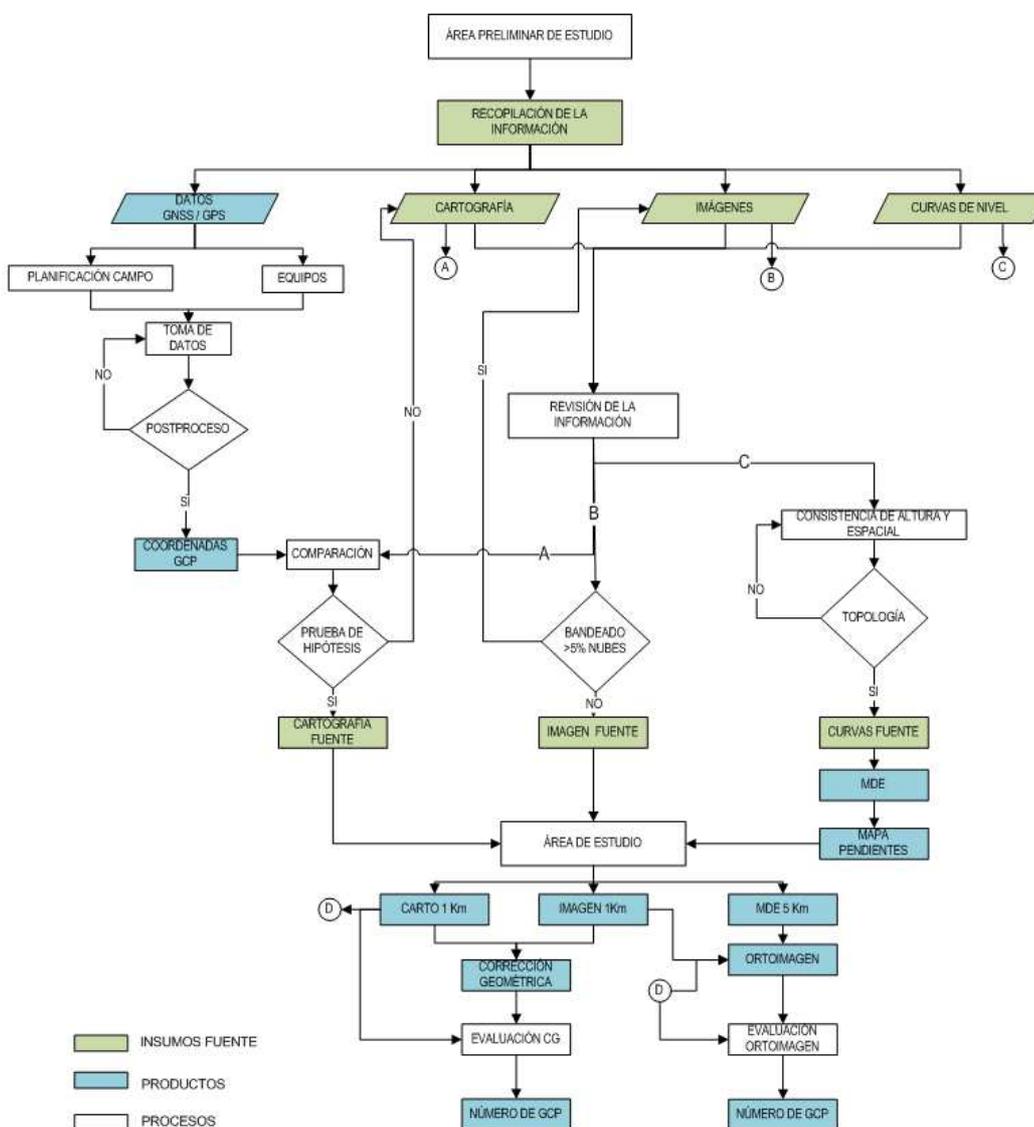
$$v = N - k \quad (\text{ecuación 2.12})$$

CAPÍTULO 3

METODOLOGÍA

La metodología aplicada en este estudio, utiliza el método inductivo, comparativo y experimental en base a la información de marco teórico, toma de datos en campo y pruebas realizadas con diferentes programas, cuyo resumen se ilustra en el gráfico 3.1.

Gráfico 3.1. Proceso metodológico para conseguir los objetivos de la tesis



Fuente: el autor (2012)

3.1 ÁREA DE ESTUDIO PRELIMINAR

Partiendo de la idea principal de la georeferenciación, de que para ubicar un producto (imagen, fotografía aérea, etc.) en su verdadera posición en la Tierra, se necesitan realizar ciertos cálculos basados en una fuente de referencia confiable y que este estudio busca precisamente calcular el número de puntos de apoyo GPS y/o GCP para realizar los ajustes geométricos de georeferenciación en una imagen, se propuso tomar en campo datos GPS para valorar la consistencia espacial de una cartografía y con ello, utilizar dicha cartografía como referencia para extraer de ahí los n insumos GCP para el ajuste.

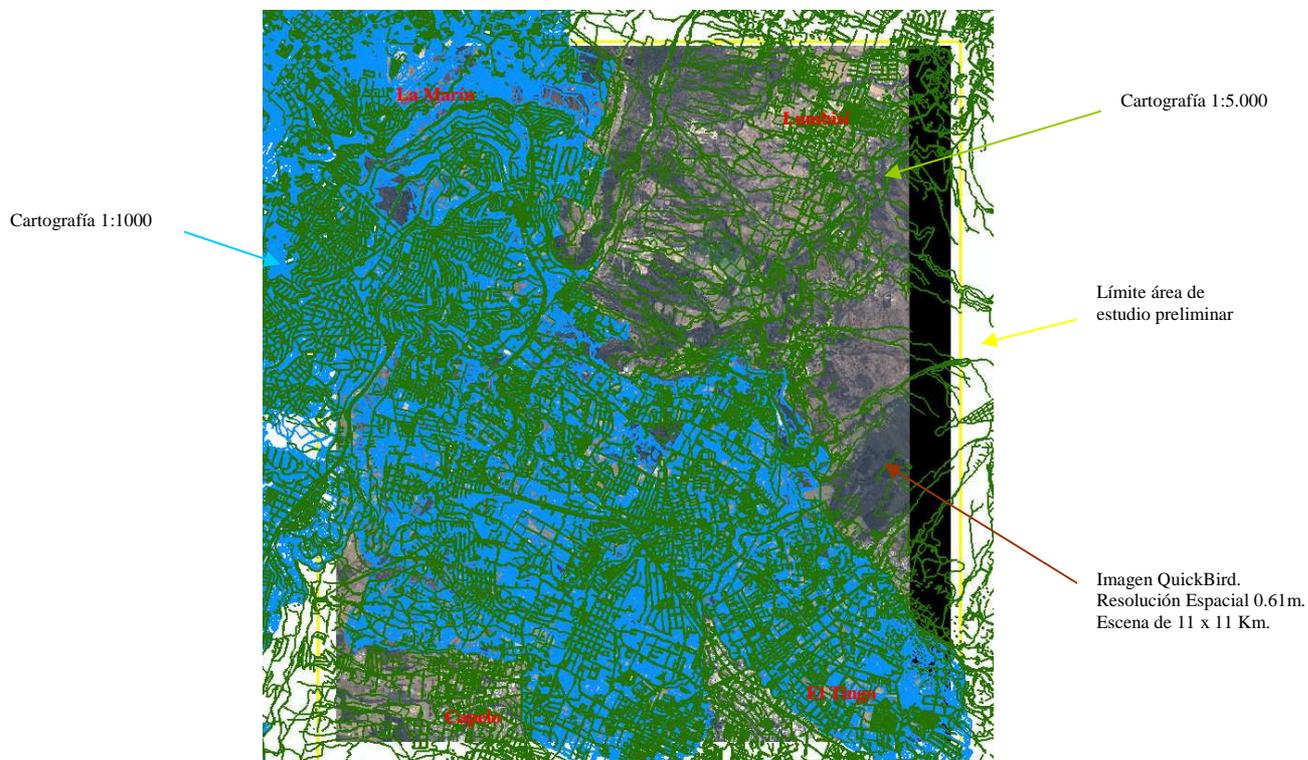
Siendo así, el área de estudio es factor importante a la hora de decidir la ejecución de un proyecto, ya que ésta ayuda a determinar los recursos materiales, económicos y personales necesarios; por tanto, se decidió tener un área preliminar en la que se contemplan las siguientes condiciones:

- a) Existencia de información de la misma zona: cartografía para escalas grandes, imágenes satelitales de alta resolución y curvas de nivel para escala 1:5.000 o mayores.
- b) Materialización de una Red de Estaciones GNSS para receptores de una frecuencia (L1 de código y fase) y/o Estaciones de Monitoreo Continuo con la finalidad de utilizar éstas como estaciones base para la corrección diferencial de los puntos de apoyo GPS en campo.
- c) Zonas que tengan pendientes morfológicamente bajas y medias.
- d) Que los elementos pictóricos de las imágenes cuenten con rasgos discretos e identificables para la toma de puntos GPS.
- e) Que existan vías de tránsito y acceso para el desplazamiento a los sitios de muestreo.

En ese sentido, el Distrito Metropolitano de Quito cuenta con las características y condiciones ideales para el cumplimiento de los intereses investigativos de esta Tesis. Por tanto, en las coordenadas que cubren los sectores la Marín (zona superior izquierda), Lumbisí (extremo superior derecho), Capelo (extremo inferior izquierdo) y El Tingo

(extremo inferior derecho), se encontró la mayor parte de la información requerida, la misma que se observa en la figura 3.1:

Figura 3.1. Área de Estudio Preliminar



Fuente: CLIRSEN (2008), adaptado por Kirby (2012)

3.2 SISTEMA DE REFERENCIA

El sistema de referencia utilizado en todo el estudio es WGS84 con las siguientes características:

Datum Geocéntrico:	WGS84
Elipsoide de Referencia:	WGS84
Semieje mayor:	6378137 m
Achatamiento:	1/298.257223563

3.3 SISTEMA CARTOGRÁFICO DE REPRESENTACIÓN

El sistema de representación plana es la Proyección UTM zona 17s con los siguientes parámetros:

Latitud de Origen:	0.0° S
Meridiano Central:	81.0° W
Falso Este:	500,000 m
Falso Norte:	10'000,000 m
Factor de Escala:	0.99960000

3.4 RECOPIACIÓN DE LA INFORMACIÓN

Imágenes satelitales: imagen satelital QuickBird, año 2005, con identificación 05AUG23155854-S2AS_R3C2-005655391010_01_P004, de alta resolución, propiedad del Centro de Levantamientos Integrados de Recursos Naturales por Sensores Remotos (CLIRSEN), proveniente de la agencia espacial Digital Globe.

Cartografía: cartografía planimétrica para escalas 1:1.000 y 1:5.000 generadas a través de restitución fotogramétrica por el Instituto Geográfico Militar (IGM) de los años 2004 y anteriores respectivamente, y transformadas a formato shape, propiedad de CLIRSEN utilizadas en el Proyecto EMAAP-Q y EMOP-Q en los años 2007 – 2008.

Curvas de Nivel: con intervalos de curva cada 5 metros, son propiedad de CLIRSEN, generadas a partir de restitución fotogramétrica por el IGM y transformadas a formato shape.

Modelo Digital de Elevaciones (MDE): el Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) de tres arcos de segundo, propiedad del Centro de Investigaciones Científicas de la Escuela Politécnica del Ejército CEINCI- ESPE, adquirido en el año 2006, que servirá para valorar la consistencia de altura del MDE_{CURVAS} que se generará a partir de las curvas de nivel citadas en el párrafo anterior.

3.5 ADQUISICIÓN DE DATOS GNSS - GPS

Los datos Global Navigation Satellite System (GNSS), en este estudio servirán como puntos de Control de Campo (GCP) para valorar las cartografías para escala 1:1.000 y 1:5.000 respectivamente, así como, para demostrar visualmente y cuantitativamente el desplazamiento existente de la imagen de estudio preliminar respecto su verdadera posición en la Tierra.

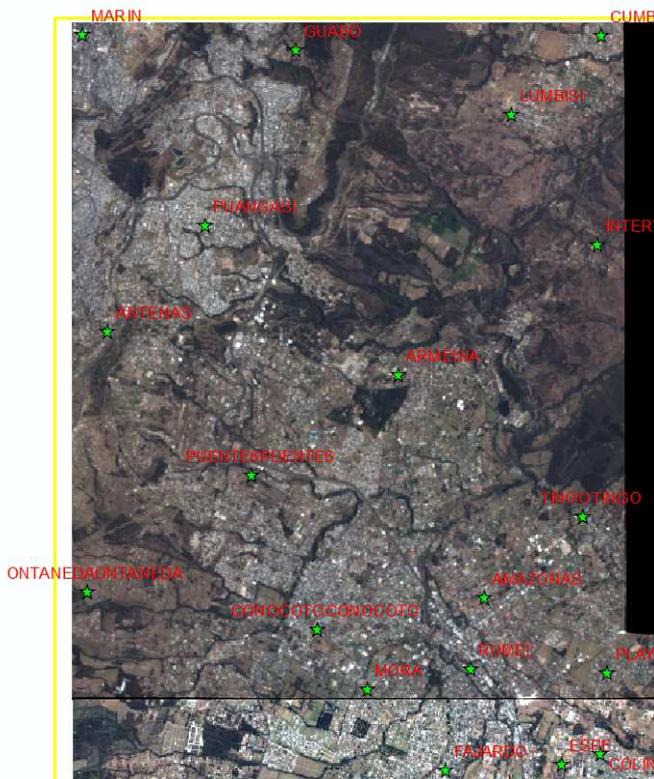
3.5.1 Planificación de campo

La planificación de campo es una de las etapas importantes que se deben realizar antes de ir al sitio de toma y plantar el equipo GNSS; en ese sentido, la planificación conlleva tiempo, conocimiento de la zona de estudio (in situ o visual), dedicación y para este estudio los siguientes criterios:

- a) Incluir un tiempo para la verificación del punto base, la existencia de su monografía y comprobación de coordenadas.
- b) Distribución aleatoria de los puntos en toda el área de estudio.
- c) Los puntos de toma móvil GPS, deben estar a menos de 15 Km. de la Escuela Politécnica del Ejército (ESPE), sitio utilizado como base GPS para el proceso de corrección diferencial en gabinete.
- d) Considerar las recomendaciones de Villa (2008) para determinar el número de puntos de apoyo GCP en un polinomio de orden 2, en ese sentido tomar de 18 a 24 puntos.
- e) Marcar puntos identificables en la imagen, que también existan en las dos cartografías, principalmente en la cartografía para escala 1:5.000 que cubre toda la imagen.
- f) Sitios de la zona de estudio que estén ubicados en pendientes bajas, medianas y altas.
- g) Seguridad y acceso a los sitios de toma planificados.

En la figura 3.2 podemos observar la distribución de los puntos, en esta figura no se incluirá la cartografía con la finalidad de dar al lector una mejor apreciación de los sitios.

Figura 3.2. Distribución de los puntos GNSS en el área de estudio



Fuente: CLIRSEN (2008), adaptado por Kirby (2012)

3.5.2 Recursos para la toma de los datos GNSS

Para el posicionamiento de la base de referencia, traslado a los sitios de toma y materialización física de los puntos móviles GNSS – GPS, se utilizaron los siguientes recursos:

- a) Para el posicionamiento de la base de referencia: un equipo GNSS de doble frecuencia (L1 y L2) que incorpora las constelaciones NAVSTAR – GPS (USA) y GLONASS (Ruso), de precisión submétrica y extensión de línea base de buena precisión hasta 200 Km. En este caso se utilizó el modelo ProMark 500 de la casa Ashtech.
- b) En la toma de coordenadas de la base para otras campañas de campo: un equipo de una frecuencia (L1) de código y fase, marca Trimble, modelo R3, de precisión $\pm (0.005m + 0.5ppm)^2$, para líneas base menores a 30 Km.
- c) Para el traslado y ubicación referencial de los puntos planificados: un Navegador GPS, la cartografía de la zona de estudio e imagen satelital.

- d) Software para la visualización y navegación a los puntos planificados: ArcGis 9.X.
- e) Software y candado de postproceso para la corrección diferencial de los datos GPS: para la solución con el equipo de doble frecuencia se utilizó GNSS Solutions y para los de una frecuencia el Trimble Business Center.
- f) Baterías especiales para los equipos de una y dos frecuencias, y pilas AA alcalinas para el navegador.
- g) Personal: una persona en la base y otra para los puntos móviles de la zona de estudio.

3.5.3 Determinación de los puntos GNSS – GPS en campo

En la determinación de los puntos GNSS – GPS, se realizaron varias campañas de campo, en resumen se describirán dos, contemplando las siguientes condiciones:

- a) Utilización del método de posicionamiento Estático Rápido Diferencial (FastStatic), con una base y un rover (móvil), receptores de una frecuencia de la marca Trimble modelo R3, y que permiten la medición de líneas base menores a los 30 kilómetros. En el área de estudio, la máxima distancia de línea base fue de 15 Km. y la mínima de 1.5 Km. aproximadamente.
- b) En cuanto al reconocimiento y monumentación de los puntos: el punto establecido como Base, fue el hito plantado en la cancha de fútbol de la ESPE, los puntos móviles fueron más de 26, de los cuales 21 tienen un grado de confiabilidad en cuanto a precisión y ambigüedades. No se hizo ninguna monumentación en el sitio de toma, como por ejemplo un Mojón, ya que visualmente *in situ* existen accidentes naturales y artificiales que son los necesarios para la valoración de la cartografía y verificación del desplazamiento de la imagen a ser corregida.
- c) Para garantizar una correcta recepción de la información satelital y cumplimiento de la precisión horizontal, en cada sesión GPS, se cumplieron además con los siguientes procedimientos:
 - Tiempo de recepción: 20 y 30 minutos
 - Ángulo de enmascaramiento: 15°
 - Número mínimo de satélites observados: 04
 - Intervalo de grabación: 15 y 5 seg.
 - PDOP: < a 5

- Tipo de Posicionamiento: FastStatic
- Correcto nivelado y puesta a punto del equipo a través de la utilización base nivelante y soporte para antena en el terreno.
- Correcta orientación de la antena
- Medición de la altura de la antena, al centro del aplique de muesca

En las cuatro primeras campañas, se utilizó en la base un equipo de una frecuencia y se tomaron los puntos móviles planificados; al momento de realizar el postproceso e ingresar las coordenadas de la base, se detectó que las coordenadas ingresadas no garantizaban una buena corrección de los puntos móviles y además en ciertos sitios no hubo la corrección de ambigüedades requerida. Por tanto, se decidió volver a dar coordenadas a la base, tomando como referencia la estación de monitoreo continuo “RIOP”, ubicada en la ciudad de Riobamba, que esta a más de 140 Km. Es así, que se necesitó de un equipo que cumpla con esta necesidad de línea base y por tanto utilizamos el ProMark 500 de doble frecuencia.

Una vez dada las coordenadas en la base, nuevamente se tomaron los puntos planificados en tres campañas más, incluyendo en éstas nuevos puntos para la verificación de la cartografía. Una muestra de toma se puede apreciar en las fotos a, b y c de la figura 3.3.

Figura 3.3. Muestras de toma de puntos de apoyo GNSS – GPS



a. Bordillo, La Colina



b. Esquina, Lumbisí



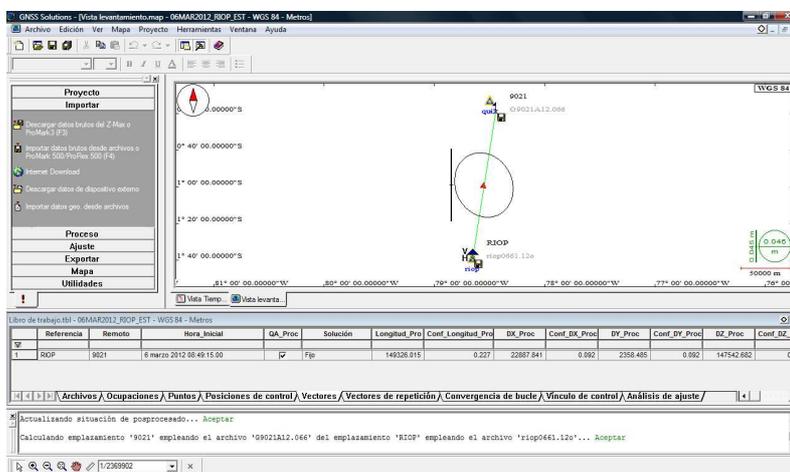
c. Cancha, Cumbayá

Fuente: El autor (2012)

3.5.4 Procesamiento de los Datos GPS (Postproceso)

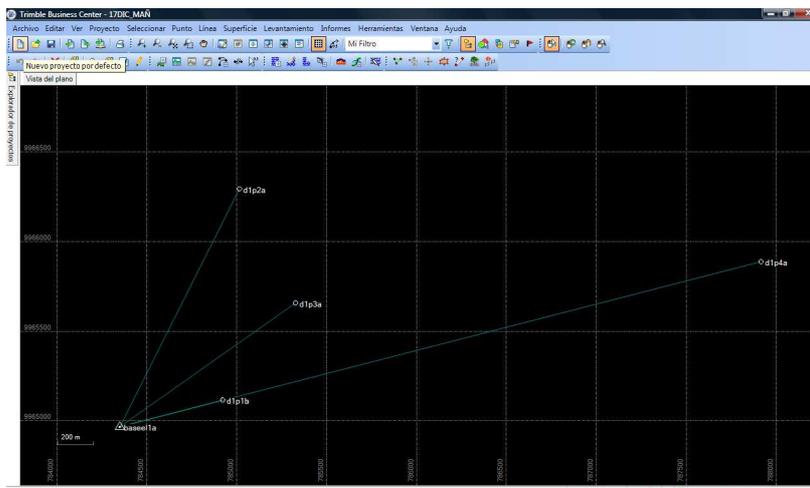
En el procesamiento de las líneas base de los puntos GPS se utilizaron dos software. Para la toma de las coordenadas de la base “Estadio” de la ESPE, se manejó el GNSS Solutions (figura 3.4) y para los puntos rover (GCP en la imagen), se utilizaron el Trimble Business Class (figura 3.5) y el descrito anteriormente; con ello, se obtuvieron del software los informes correspondientes al cálculo de líneas base, estadísticos y coordenadas finales de los puntos con sus respectivas precisiones.

Figura 3.4. Procesamiento de la Base “Estadio”



Fuente: El autor (2012)

Figura 3.5. Procesamiento de líneas base



Fuente: El autor (2012)

Los resultados que contienen el elenco de coordenadas se encuentran en el capítulo de resultados.

3.6 REVISIÓN DE LA INFORMACIÓN EXISTENTE

3.6.1 Evaluación de la imagen

La imagen utilizada en la zona de estudio preliminar proviene de la agencia espacial Digital Globe; es una imagen QuickBird que de acuerdo a sus metadatos en resumen en la tabla 3.1 tiene las siguientes características:

Tabla 3.1. Características de la imagen QuickBird – zona preliminar de estudio.

Misión	QuickBird 2	BanID	BGRN
Año metadatos	2007-09-04	Resolución Espacial	0.61 m
Nivel Procesamiento	LV 2 ^a	Formato	GeoTiff
Columnas y Filas	14337, 16384	Mode	FullSwach
Fecha	2005-08-23	Datum	WGS84
Radiometría	Corregida	Proyección	UTM
Resolución Radiométrica	16 bits	Zona	17

Fuente: Digital Globe (2007), adaptado por el autor (2012)

Se valoró visualmente que la imagen no tenga problemas radiométricos, bandeamiento, existencia de una correcta homogenización de colores, la no existencia de áreas sin información (Gaps) y que el contenido total de nubes sea inferior al 5%.

Así mismo, visualmente en el software ArcGIS 9.X se constató el desplazamiento de la imagen respecto a su correcta posición en la Tierra, Para el efecto entonces, se utilizó los puntos GNSS – GPS postprocesados (una muestra de lo indicado se encuentra en el capítulo 4).

Para calcular el corrimiento de la imagen, se generó un archivo de 23 puntos de los sitios a evaluar y los vectores correspondientes que representan la distancia y dirección de los puntos GPS hacia sus homólogos en la imagen.

Finalmente, se calcularon los estadísticos y los resultados obtenidos se encuentran ilustrados en el capítulo de resultados.

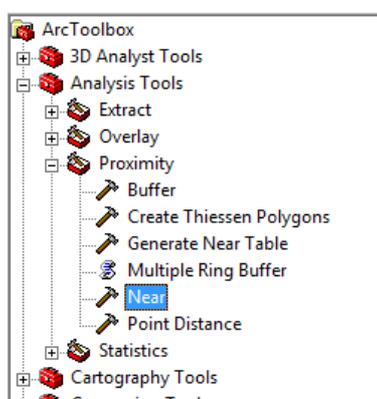
3.6.2 Evaluación de la cartografía planimétrica

Primeramente, se revisó que exista la información necesaria para hacer la comparación con los puntos de control y la imagen; de esta información se utilizaron los ejes viales, manzanas, predios, canchas deportivas, parterres, etc.; no se utilizó la red hidrográfica (no incluía), ni tampoco se evaluó la consistencia espacial de los elementos (topología).

Posteriormente, se hizo una evaluación visual de las dos cartografías; más adelante, éstas se encuentran desplazadas con alguna diferencia en esas escalas.

Se procedió a evaluar tanto la cartografía para escala 1:1.000 y 1:5.000 con los puntos de control GNSS – GPS postprocesados; para ello efectuamos un análisis espacial en ArcGIS mediante el comando “Near” que se encuentra en el ArcToolBox / Analysis Tools / Proximity; tal como se muestra en la figura 3.6.

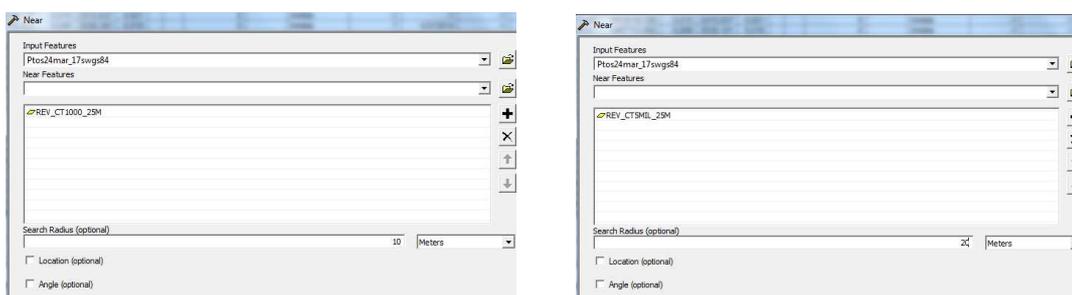
Figura 3.6. Herramienta de análisis espacial para cálculo de distancia entre dos puntos.



Fuente: El autor (2012)

Para cada cartografía se aplicó este comando y como dato de entrada para evaluar la distancia de los puntos GPS hacia los homónimos cartográficos se utilizó el archivo Ptos24mar_17sWGS84 (elenco de coordenadas GNSS – GPS postprocesados) y un radio de búsqueda de 10m para la cartografía 1:1000 (parte a, ilustración izquierda de la figura 3.7) y 20 m para 1:5.000 (parte b, ilustración derecha de la misma figura).

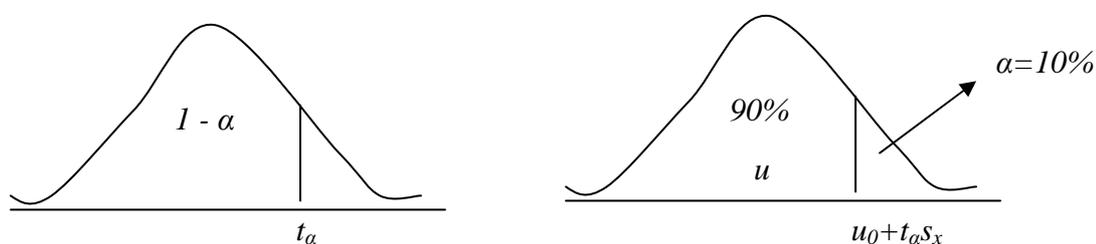
Figura 3.7. Uso de la herramienta Near e ingreso de parámetros.



Fuente: El autor (2012)

Con los resultados alcanzados del análisis de proximidad (ver capítulo 4), se realizó a la cartografía más cercana a los puntos GPS una prueba de hipótesis y de esta manera enunciar en la Hipótesis Nula (H_0) “que la cartografía X cumple con el error horizontal estipulado para esas escalas con un nivel de confianza del 90%”. Como la muestra es inferior a 30 datos no se puede utilizar la curva de Gauss, entonces se empleó la tabla t de Student; interpretación de la misma que se puede observar en la figura 3.8:

Figura 3.8. Prueba t – Student, cola derecha y representación del nivel de confianza.



Fuente: Murray (1991), modificado por el autor (2012)

Donde:

t_α = son los valores en percentiles para la distribución t de Student con v grados de libertad

$1 - \alpha$ = nivel o intervalo de confianza en porcentaje

u = es igual a la media de los datos muestra

u_0 = es la precisión horizontal para la escala X, igual a PH

s_x = error típico de la muestra, que es igual a $s_x = \frac{s}{\sqrt{n}}$ (ecuación 3.1)

s = desviación estándar de la muestra

n = el tamaño de la muestra

Finalmente, la prueba de hipótesis quedaría enunciada de la siguiente manera:

$$H_0: u \leq u_0$$

$$H_1: u > u_0$$

Si $PH = 0.3mm \times e$ (ecuación 3.2)

La prueba de hipótesis se escribiría de la siguiente forma:

$$H_0: u \leq 0.3mm \times e$$

$$H_1: u > 0.3mm \times e$$

Donde:

e = es el factor de escala de la cartografía

E = escala de la cartografía = 1: e

0.3mm = es el error planimétrico en papel

H_1 = es la hipótesis alternativa.

Los cálculos y las respuestas de la evaluación de la cartografía se encuentran en el capítulo de resultados.

3.6.3 Revisión de de las curvas de nivel.-

Se valoró la consistencia entre curvas de nivel, es decir, si tenemos la curva 100m y hay un intervalo de 5 metros entre curvas, la siguiente curva deberá ser 105m o 95m o 100m (Ej. planicie que continúa en la siguiente Carta Topográfica) pero no deben haber valores

diferentes a los ejemplos indicados. En resumen, se siguieron las siguientes características descritas por Emory, et al. (1983):

- Toda curva refleja el cambio de la forma del terreno es usualmente gradual
- Las curvas de nivel tienden unas con otras a ser paralelas aproximándose a las formas del terreno las de arriba y las de abajo (cambios graduales).
- Las curvas de nivel al aproximarse a los ríos y quebradas, durante un corto espacio son paralelas a ellos y luego se trazan hacia arriba, en forma de “V”, con la V apuntando aguas arriba.
- Cuando un río o quebrada se divide en otros dos, las curvas de nivel en vez de formar una V, van a formar una M...
- Las curvas de nivel nunca se bifurcan...
- Las curvas de nivel nunca se cruzan ni tocan unas con otras, excepto en escarpes o acantilados verticales. Abran casos en los que la escala del mapa no permita mostrar las curvas de nivel sin necesidad de que estas tengan que juntarse.
- Las curvas de nivel se cierran en si mismas
- Picos y cimas son fácilmente identificados por que las curvas se cierran en la misma y pequeña área...

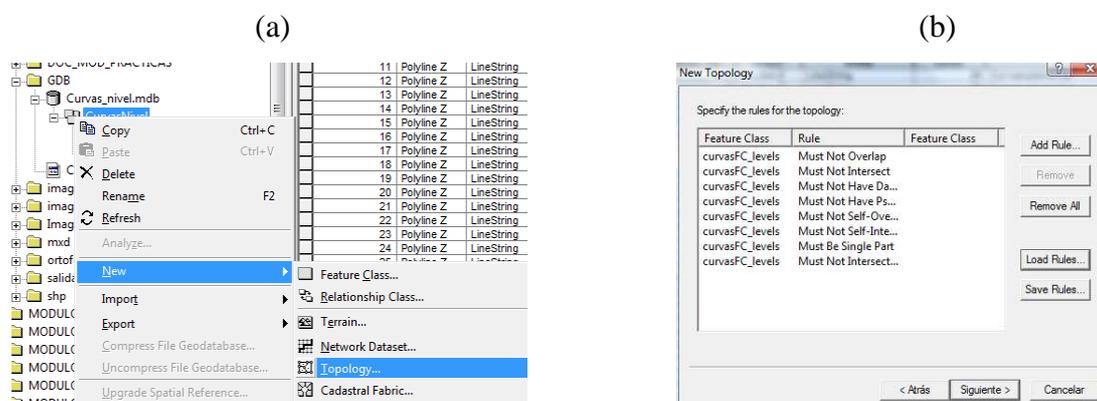
También se hizo una revisión de las relaciones espaciales (coincidencia, conectividad, vecindad o adyacencia, inclusión, proximidad) mediante la aplicación de las siguientes 8 reglas topológicas para arcos (líneas):

- Must Not Overlap
- Must Not Intersect
- Must Not Have Dangles
- Must Not Have Pseudos
- Must Not Self-Overlap
- Must Not Self-Intersect
- Must Be Single Part
- Must Not Intersect Or Touch Interior

Para la aplicación de estas reglas topológicas se necesitó de la construcción de una Personal GeoDatabase (PGDB), la cual puede ser elaborada desde el ArcCatalog del ArcGIS, en la cual se implementó un Feature Data Set (FDS), luego se importaron las curvas de nivel (en forma múltiple) como Feature Class (FC).

En concordancia a lo descrito en cuanto a la aplicación de las reglas topológicas en la parte (a) de la figura 3.9, se observa qué función habilita la creación de la topología, y en la parte (b) se visualiza las reglas descritas:

Figura 3.9. Generación de la Topología



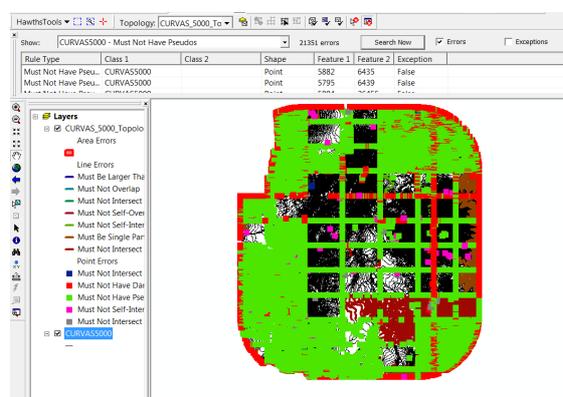
Fuente: Kirby (2011)

Los errores obtenidos al validar las reglas topológicas, se encuentran listos en el capítulo de resultados.

Para facilitar la corrección topológica con relación al tema de estudio, es necesario cortar las curvas con la función de extracción clip.

Continuando con el proceso, mediante el empleo del software ArcGIS, en el ArcMap se analiza, corrige y procesa la topología, tal como se observa en la siguiente figura 3.10

Figura 3.10. Corrección de la topología



Fuente: El autor (2012)

3.6.4 Revisión del Suttle Radar Topography Mission

Considerando la información presentada en el marco teórico, para el caso del SRTM, éste modelo es una recopilación de algunas versiones del Suttle Radar Topography Mission (SRTM) de 3 arcos de segundo; así mismo, el modelo ya fue valorado por Kirby, en el año 2007, presentándose en las conclusiones lo siguiente: “Analizando el SRTM en el Ecuador Continental, se han encontrado áreas vacías sin información, las mismas que tienen mayor presencia en la zona de la Cordillera de los Andes; en la línea de la costa, los valores de altura no están bien definidos; en las zonas de uso para camaroneras se han encontrado valores de -2 a -20 metros y menores; en las zonas costaneras de suelo desnudo, también se han visto valores de -2 -4 metros. En el sector en donde geográficamente se encuentra la Isla Santay (Provincia del Guayas), no existe información del SRTM, es decir que toda la Isla tiene asignado el valor de -326767; evaluando el número de Gaps/Holes (datos sin información) del DEM del SRTM para el caso del Ecuador Continental, hay un 0.917% de Gaps”.

3.7 GENERACIÓN Y REVISIÓN DEL MDE_{CURVAS}

Una vez revisada la consistencia de altura y corregida la topología en las curvas de nivel, se generará un modelo digital de elevaciones; al modelo generado se lo revisará comparándolo con el MDE SRTM de 3 arcos de segundo y también con otro modelo

elaborado por otro método de generación; éste último solamente aparecerá como dato en la comparación de los MDE.

Hay varios métodos para generar Modelos Digitales de Elevaciones (MDE), existen algoritmos directos e indirectos, estadísticos y geoestadísticos, vectoriales y raster, etc. los mismos que dependiendo del propósito, de las obstrucciones, de la orografía, de la cantidad de muestras, del tipo de dato (puntos o líneas), etc., pueden ser estimados en uno y varios software; como por ejemplo mediante el programa ArcGis, en el que se puede utilizar la herramienta Topo To Raster, la cual a más de ingresar como datos las curvas de nivel, permite modelar nuestro datos relacionándolos con los puntos acotados, drenajes tipo línea y polígono, límite y hundimientos.

Una consideración importante es, que lo que se va a modelar es una variable continua y para este caso de estudio solamente se cuenta como insumo un dato tipo vector, las curvas de nivel o isolíneas, que representan la altimetría para escala 1:5.000 con intervalo de curva cada 5m. Por tanto, para generar el modelo a utilizarse para la generación de la ortoimagen se prefirió un software que considere únicamente esta variable, como es el caso del programa ERDAS, versión 2011.

Dentro del entorno de ERDAS, en el vínculo “Terrain Preparation”, escoger Surface Tool (herramienta que genera superficies a partir de puntos, líneas, datos en formato shape, dxf, dwg, ASCII, etc.), entonces aparecerá la ventana del entorno para generar superficies en 3 dimensiones (Surface 3d), seleccionar el botón Add Data, escoger el tipo de dato de ingreso, tal como se observa en la figura 3.11, así como el atributo para Z, las alturas de las curvas.

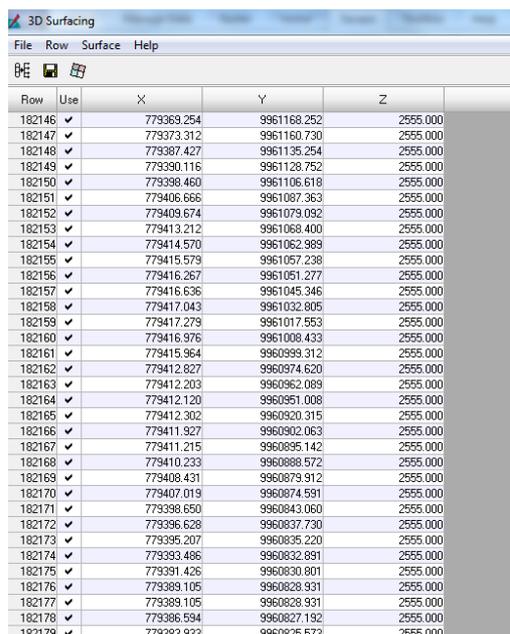
Figura 3.11. Ingreso de parámetros para generar un MDE en ERDAS



Fuente: El autor (2012)

Buscar el directorio en donde se encuentran los datos, escoger el archivo de curvas de nivel cada 5 metros depurado, aceptar y automáticamente el programa ERDAS, lee las coordenadas y alturas de los puntos que conforman las isolíneas, ver la figura 3.12.

Figura 3.12. Coordenadas leídas para generar un MDE en ERDAS



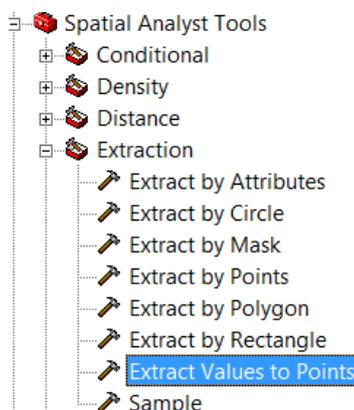
Row	Use	X	Y	Z
182146	✓	779369.254	9961168.252	2555.000
182147	✓	779373.312	9961160.730	2555.000
182148	✓	779387.427	9961135.254	2555.000
182149	✓	779390.115	9961128.752	2555.000
182150	✓	779398.460	9961106.618	2555.000
182151	✓	779406.655	9961087.363	2555.000
182152	✓	779409.674	9961079.092	2555.000
182153	✓	779413.212	9961068.400	2555.000
182154	✓	779414.570	9961062.989	2555.000
182155	✓	779415.579	9961057.238	2555.000
182156	✓	779416.267	9961051.277	2555.000
182157	✓	779416.636	9961045.346	2555.000
182158	✓	779417.043	9961032.805	2555.000
182159	✓	779417.279	9961017.553	2555.000
182160	✓	779416.976	9961008.433	2555.000
182161	✓	779415.964	9960993.312	2555.000
182162	✓	779412.827	9960974.620	2555.000
182163	✓	779412.203	9960962.089	2555.000
182164	✓	779412.120	9960951.008	2555.000
182165	✓	779412.302	9960920.315	2555.000
182166	✓	779411.927	9960902.063	2555.000
182167	✓	779411.215	9960895.142	2555.000
182168	✓	779410.233	9960888.572	2555.000
182169	✓	779408.431	9960879.912	2555.000
182170	✓	779407.019	9960874.591	2555.000
182171	✓	779398.650	9960843.060	2555.000
182172	✓	779396.628	9960837.730	2555.000
182173	✓	779395.207	9960835.220	2555.000
182174	✓	779393.486	9960832.891	2555.000
182175	✓	779391.426	9960830.801	2555.000
182176	✓	779389.105	9960828.331	2555.000
182177	✓	779389.105	9960828.331	2555.000
182178	✓	779386.594	9960827.192	2555.000
182179	✓	779383.933	9960825.573	2555.000

Fuente: El autor (2012)

Seleccionar el acceso “Perform Surfacing”, que permite acceder a la ventana “Surfacing”, en la cual se ingresarán los parámetros del MDE, nombre de salida, tipo de dato, etc. Como nombre de salida “MDE_{CURVAS}”, tamaño de píxel 5m, método de interpolación “Linear Rubber Sheeting”, tipo de dato 16bits signed, los demás parámetros se deja como están por definición y se procede a generar el modelo. El resultado del mismo, se encuentra en el capítulo de resultados.

Para la comparación de alturas del DEM_{CURVAS}, primero se genera un shape de puntos con 32 muestras, luego se procede a hacer una extracción de los valores de altura, del DEM_{CURVAS}, del DEM generado con la opción Topo to Raster y del DEM SRTM, con la opción “Extract Values to Points” que se encuentra dentro de Spatial Analyst Tools / Extraction en el programa ArcGis, se observa la figura 3.13

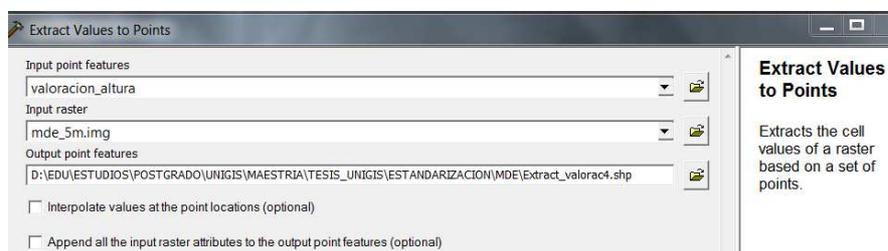
Figura 3.13. Herramienta para la extracción de valores de alturas en un Raster



Fuente: El autor (2012)

El procedimiento de extracción se lo realiza para cada DEM, en el cual se ingresa los parámetros de entrada, tal como se muestra en la figura 3.14.

Figura 3.14. Parámetros de ingreso para extraer el valor de la altura en un Raster



Fuente: El autor (2012)

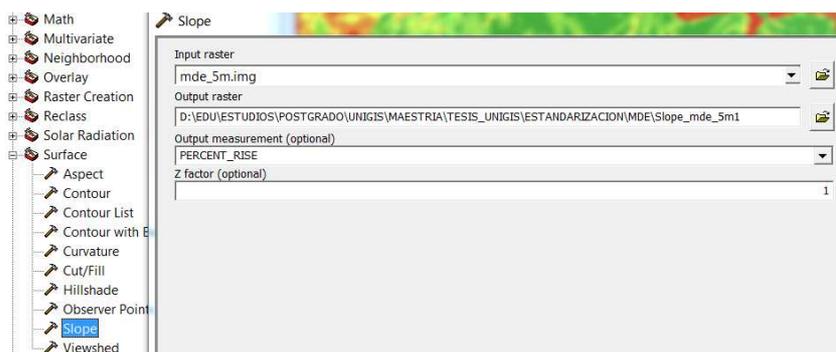
Finalmente, para tener los valores de altura en una sola tabla de registros, hacer un Join por atributos. Los resultados y estadísticos del análisis realizado se aprecian en el capítulo 4 “resultados”.

3.8 GENERACIÓN DEL MAPA DE PENDIENTES

Para la generación del mapa de pendientes se utiliza como insumo el MDE_{CURVAS}, mediante el programa ArcGis, para ello se aplica la herramienta Slope (pendiente) que se encuentra en el ArcToolBox, dentro de Spatial Analyst / Surface. Ingresar los parámetros

para la elaboración del mapa de pendientes, seleccionar el directorio y nombre del archivo de salida y escoger para el cálculo la opción de porcentaje, tal como se observa en la figura 3.15.

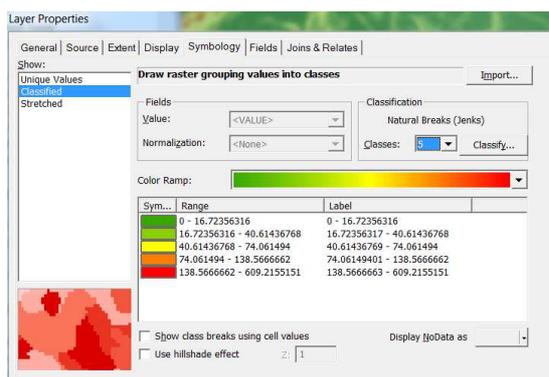
Figura 3.15. Herramienta y parámetros para la generación de un mapa de pendientes



Fuente: El autor (2012)

Una vez generado el mapa, revisar las clases automáticas que fueron generadas, para ello abrir las propiedades del mapa de pendientes, escoger la viñeta “Symbology” para observar en la figura 3.16 las clases que mecánicamente se calcularon:

Figura 3.16. Clasificación automática de clases del mapa de pendientes.



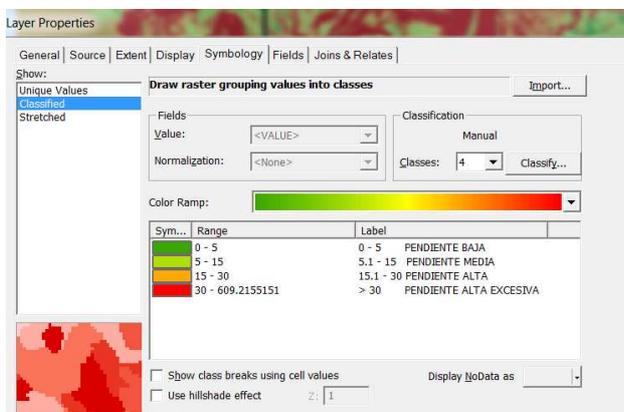
Fuente: El autor (2012)

Observando las clases ilustradas en la figura 3.16 y relacionándolas a la información teórica de la pendiente expresada en el capítulo 2, un porcentaje $<$ a 16.8% asignado en la primera clase y un rango de 16.8 y 40.7% de la segunda clase, es un rango de clases muy amplio que probablemente confunde y generaliza al interprete a la hora de decidir si

es una pendiente baja o media; también si se confronta la pendiente $< 16.8\%$ con la tabla de la clasificación inglesa de pendientes (capítulo 2), en este porcentaje ya se incluyen las clases: suave, moderadamente pendiente, fuertemente pendiente y pendiente casi excesiva; lo que demuestra que no hay un proceso único de clasificación, que la clasificación no es idónea para usos agrarios o urbanos o estos fines y es por tanto, necesaria una reclasificación del mapa de pendientes.

Para la reclasificación de pendientes, se analiza la teoría de pendientes, en estas se observan ejemplos importantes del cómo hacer, aunque en ninguno de los existentes hay una receta de clasificación para uso y corrección de imágenes, lo que si nos recomienda es que una clasificación debe tener de 4 a 8 clases. Entonces, por analogía, se decidió crear 4 clases: pendientes bajas $\leq 5\%$, pendientes medias $> 5\%$ y $\leq 15\%$, pendiente alta $> 15\%$ y $< 30\%$, pendiente alta excesiva $> 30\%$, cuya ilustración de clases, se aprecia en la figura 3.17 y el mapa resultante se encuentra presente en el capítulo 4.

Figura 3.17. Clases reclasificadas de pendiente.

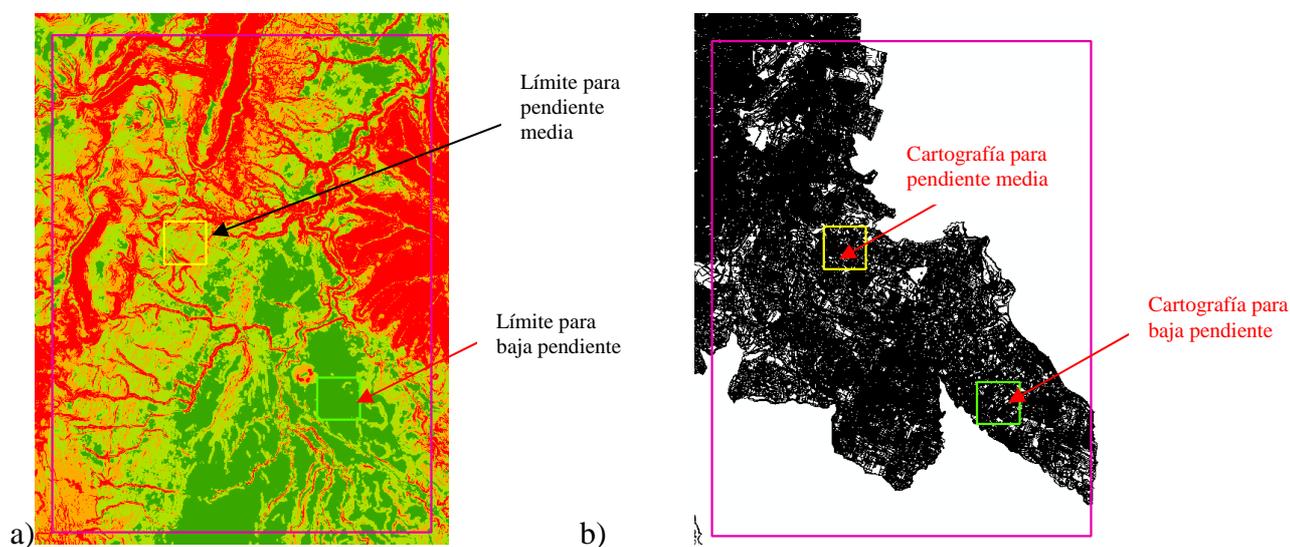


Fuente: El autor (2012)

3.9 DETERMINACIÓN DEL ÁREA DEFINITIVA DE ESTUDIO

En definitiva, se crearon dos áreas de estudio, una para pendientes bajas y otra en medias, ambas tienen una extensión de 1 x 1 Km., basadas en la clasificación de pendientes (figura 3.18 parte a) y en la existencia de cartografía 1: 1:000 (parte b de la figura).

Figura 3.18. Áreas de estudio para pendiente baja y media.



Fuente: El autor (2012)

Cabe señalar, que a pesar de que la hipótesis nula se rechazó por que el desplazamiento entre la cartografía para escala 1:1.000 vs. los puntos de control GCP obtenidos con GPS tienen como media ± 0.979 metros, varios autores como Pernía (2012), indican que los nuevos sensores (Ej. QuicBird) permiten la creación de mapas de escala hasta 1:5.000. Por tanto, el desplazamiento mencionado es inferior al tolerado para escalas 1:5000 (± 1.5 m) y si es posible utilizar la cartografía 1:1.000 para la corrección geométrica de la imagen.

Definidas las áreas, se continuó recortando y estandarizando la información. En ese sentido, se recortaron las imágenes y cartografía para escala 1:1.000 en base a los dos límites, mientras que para cortar el MDE_{CURVAS}, primero se generó un área mayor al de las zonas de estudio (área de proximidad), con un buffer de 1Km respecto al límite; es decir, un buffer para cada límite. Las imágenes resultantes se aprecian en el capítulo de resultados.

3.10 CG Y ESTIMACIÓN DEL NÚMERO DE GCP

Dentro del proceso de corrección geométrica (CG), de acuerdo a Villa (2008), para la corrección geométrica se utiliza normalmente un polinomio de segundo grado, ya que polinomios mayores a éste pueden introducir deformaciones no semejantes a la topografía

original del territorio; por tanto, se utilizó un polinomio de orden 2 para la corrección en el área de pendiente baja como en la de pendiente media.

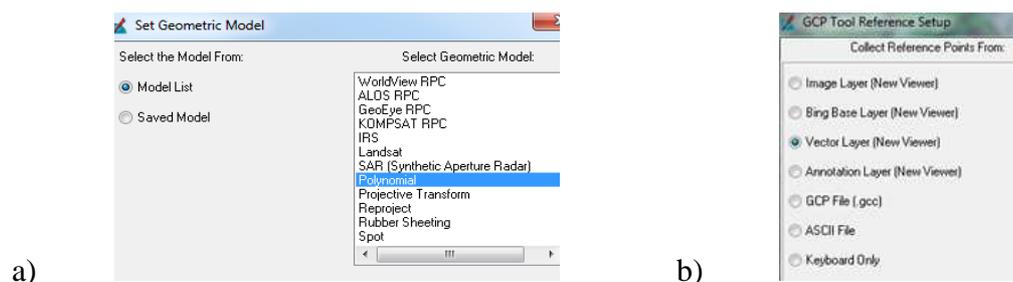
Así también, para calcular el número ideal de GCP, se propuso realizar pruebas de cuántos puntos pinchados en la imagen hacen que ésta se ajuste bien a la cartografía de referencia con el procesamiento (corrección geométrica). Siendo un polinomio de orden 2 con 6 coeficientes (incógnitas), mínimo se necesitan 6 puntos, probando lo descrito se necesita un punto más (para tener grados de libertad). Entonces se estableció probar con 7 puntos, 9 puntos (relacionando con la fotogrametría), 21 puntos (recomendaciones de Villa en el 2008), 30 y 42 puntos respectivamente para pendiente baja y también en pendiente media. La metodología de ejecución se detalla a continuación:

3.10.1 CG y estimación del número de GCP en pendiente baja

Para la corrección se utilizó el programa ERDAS 2001, para ello se utilizó la información cortada del área de estudio de pendiente baja, la imagen y cartografía para escala 1:1.000.

En el programa ERDAS, cargar la imagen correspondiente, luego seleccionar la viñeta “Multispectral” y la opción Control Points, que permite realizar dicha corrección y en la que se visualizan una serie de modelos utilizados para realizar correcciones a diferentes tipos de imágenes; seleccionar el modelo “Polynomial” (parte a de la figura 3.19), para posteriormente escoger el tipo de dato que se utilizará como fuente de referencia (parte b de la figura 3.19).

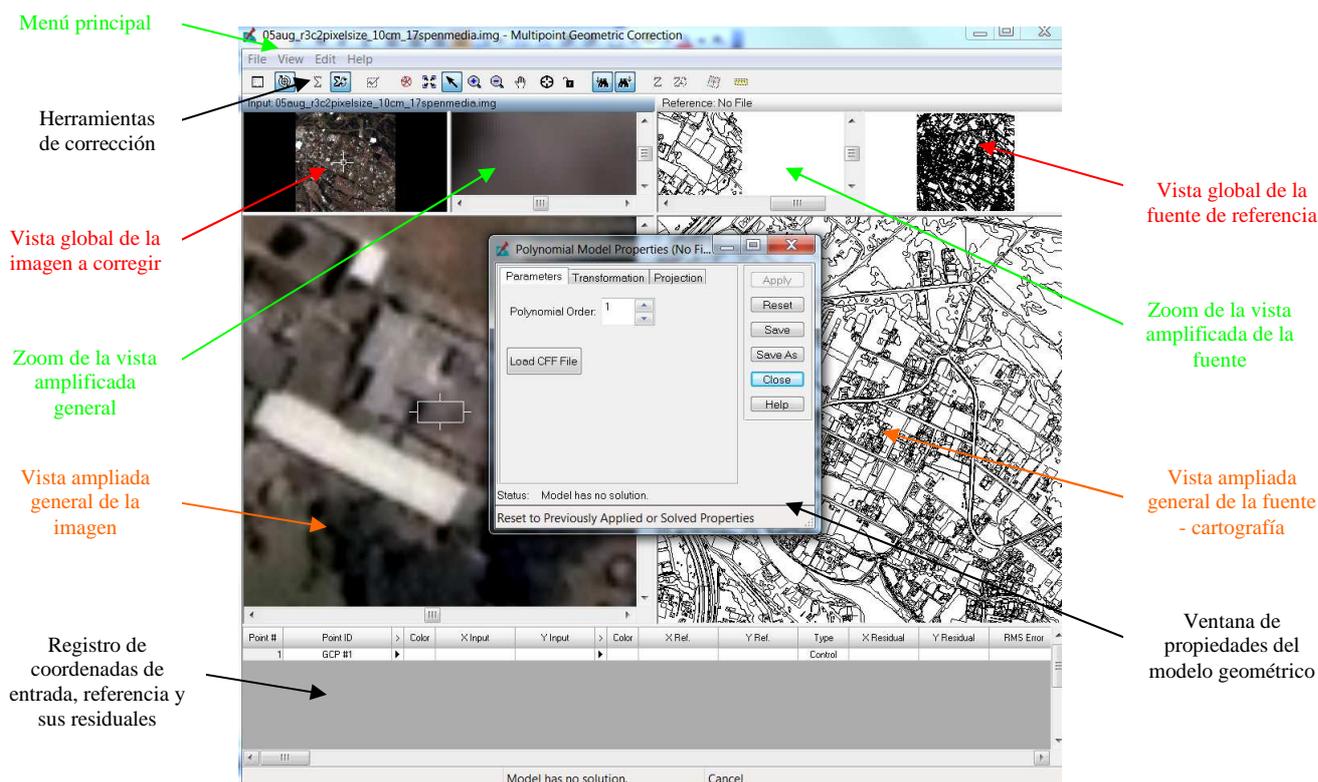
Figura 3.19. Selección del modelo geométrico de corrección y fuente de referencia.



Fuente: El autor (2012)

Escoger para este caso la cartografía 1:1.000 pendiente baja con sistema de referencia WGS84, proyección UTM, zona 17 Sur, y a continuación se visualizará en la figura 3.20 el entorno de trabajo para realizar la corrección “Multipoint Geometric Correction”.

Figura 3.20. Entorno de trabajo ERDAS para la corrección geométrica.



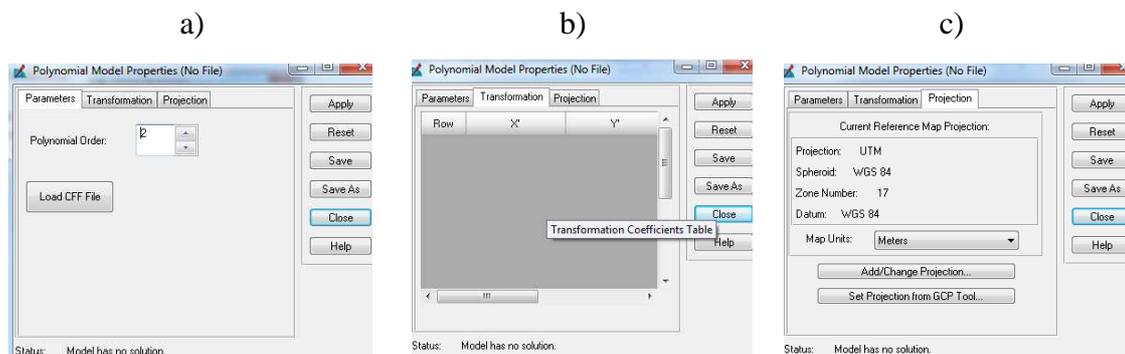
Fuente: El autor (2012)

Como se aprecia en la figura 3.20, prácticamente desde la mitad a la izquierda del entorno de trabajo están los dispositivos para el manejo de la imagen a corregirse, mientras que a la derecha están componentes del dato o fuente de referencia. Para conocer más del entorno y sus herramientas existen los accesos “Help” con la ayuda correspondiente.

En la misma figura hay que destacar la importancia de la ventana de propiedades del modelo geométrico que contiene tres vínculos (pestañas); en la cual se ingresará para la pestaña de parámetros un orden 2 del polinomio, en la de transformación no se visualizará inicialmente los coeficientes de solución del modelo y en projection, definir el mismo sistema de referencia utilizado en los datos de entrada, así como se observa en la figura 3.21, parte a, b y c, respectivamente. En adición a lo descrito, se puede guardar el modelo

para una posterior utilización o cerrar la ventana de propiedades para comenzar el proceso de ingreso de coordenadas.

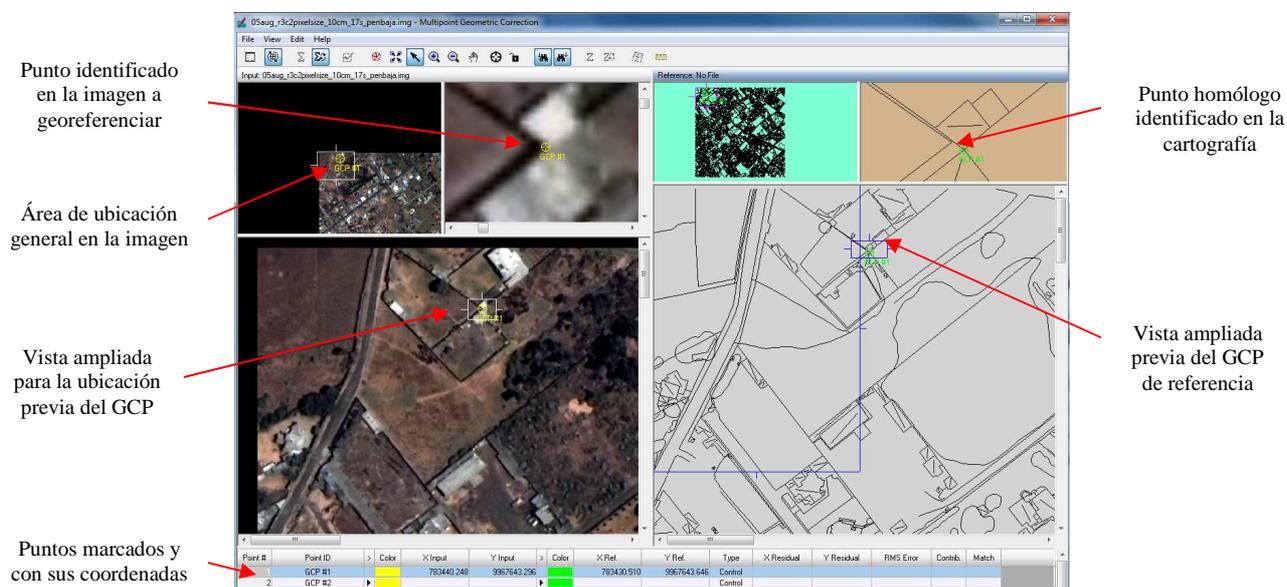
Figura 3.21. Selección del modelo geométrico de corrección y fuente de referencia.



Fuente: El autor (2012)

Una vez configurado el entorno de trabajo, se procede al ingreso de coordenadas. Escoger en las herramientas de corrección el botón “Create GCP”, buscar en la imagen de estudio un objeto mapeable y discernible (esquina de una cancha, terreno o un vértice de una vereda, etc.) que sea igual al de la fuente de referencia. Si no se encuentra el objeto propuesto, se continúa buscando hasta encontrar ese punto (sitio) ideal identificable; una vez hallado el sitio, hacer el acercamiento (zoom in) pertinente y pinchar el primer punto, tanto en la imagen de entrada (la no georeferenciada) como en el homólogo identificado en la cartografía. En la figura 3.22 se observa un ejemplo del proceso descrito:

Figura 3.22. Ingreso de GCP en la imagen a corregir y en la cartografía de referencia.



Fuente: El autor (2012)

Continuando con el marcado (pinchado), se ingresaron para el primer producto hasta 7 puntos de control, distribuidos en forma aleatoria en la imagen y revisando desde luego el error cuadrático medio (RMS), el mismo que se observa en la figura 3.23.

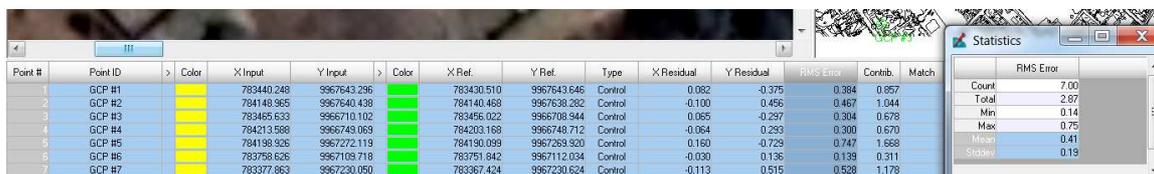
Figura 3.23. Coordenadas (GCP) de la primera prueba, residuales y estadísticos.

Point #	Point ID	Color	X Input	Y Input	Color	X Ref.	Y Ref.	Type	X Residual	Y Residual	RMS Error	Contrib.	Match
1	GCP #1	Yellow	783440.248	9967643.296	Green	783430.510	9967643.646	Control	0.028	0.032	0.043	0.038	
2	GCP #2	Yellow	784148.365	9967640.436	Green	784140.468	9967638.262	Control	0.228	0.257	0.344	0.303	
3	GCP #3	Yellow	783465.633	9967710.102	Green	783456.022	9967708.944	Control	-0.208	-0.235	0.314	0.277	
4	GCP #4	Yellow	784213.598	9967749.959	Green	784203.168	9967748.712	Control	-0.016	-0.016	0.025	0.022	
5	GCP #5	Yellow	783866.544	9967263.939	Green	783857.160	9967262.910	Control	-1.355	-1.528	2.042	1.803	
6	GCP #6	Yellow	783758.626	9967109.718	Green	783751.842	9967112.034	Control	1.419	1.600	2.138	1.888	
7	GCP #7	Yellow	783667.164	9967327.873	Green	783657.667	9967327.741	Control	-0.096	-0.108	0.145	0.128	

Fuente: El autor (2012)

Distribuyendo de mejor forma los mismos 7 puntos de control por toda la imagen, con más detenimiento y buscando rasgos buenos identificables, el RMS mejoró, tal como se ilustra en la figura 3.24.

Figura 3.24. RMS de la primera prueba con el cambio de distribución de GCP



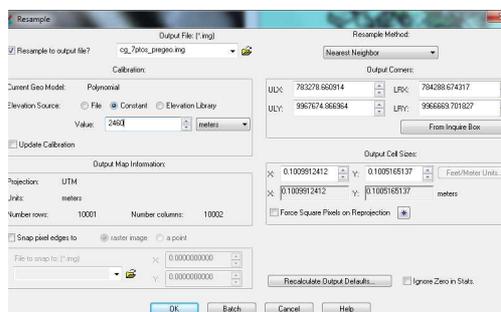
Point #	Point ID	Color	X Input	Y Input	Color	X Ref.	Y Ref.	Type	X Residual	Y Residual	RMS Error	Contrib.	Match
1	GCP #1	Yellow	783440.249	9967643.296	Green	783430.510	9967643.646	Control	0.062	-0.375	0.384	0.057	
2	GCP #2	Yellow	784148.965	9967840.438	Green	784140.468	9967638.282	Control	-0.100	0.456	0.467	1.044	
3	GCP #3	Yellow	783465.633	9966710.102	Green	783456.022	9966708.944	Control	0.085	-0.297	0.304	0.678	
4	GCP #4	Yellow	784213.988	9966749.069	Green	784203.168	9966748.712	Control	-0.064	0.293	0.300	0.670	
5	GCP #5	Yellow	784198.926	9967272.119	Green	784190.099	9967269.920	Control	0.160	-0.729	0.747	1.668	
6	GCP #6	Yellow	783758.626	9967109.718	Green	783751.842	9967112.034	Control	-0.030	0.136	0.139	0.311	
7	GCP #7	Yellow	783377.863	9967230.050	Green	783367.424	9967230.624	Control	-0.113	0.515	0.528	1.178	

RMS Error	
Count	7.00
Total	2.87
Min	0.14
Max	0.75
Mean	0.41
StdDev	0.19

Fuente: El autor (2012)

Finalmente, para realizar la corrección geométrica, activar el botón “Resample” e ingresar los parámetros para la ejecución; en ese sentido, en método de resampleo (relacionado con la corrección radiométrica) seleccionar “el vecino más cercano”, poner un nombre de archivo de salida, tamaño del píxel igual al de la imagen de entrada y en fuente de la elevación para una altura constante, colocar el promedio de altura del área de estudio o poner cero considerando que hipotéticamente la zona es plana (pendiente baja). En la figura 3.25 se observan los parámetros señalados:

Figura 3.25. Parámetros finales para la corrección geométrica de la imagen (resample)



Fuente: El autor (2012)

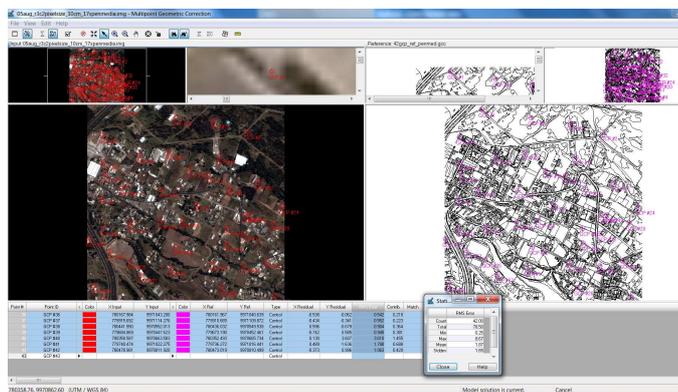
Los resultados de las pruebas para el cálculo del número de puntos de control, así como las imágenes corregidas para 7, 9, 21... puntos, se encuentran descritas en el capítulo 4.

3.10.2 CG y estimación del número de GCP en pendiente media

Los procedimientos seguidos en esta etapa, siguen exactamente la misma metodología descrita para pendiente baja, las diferencias serían: los insumos utilizados, la imagen y la cartografía para pendiente media) y que adicionalmente a las pruebas de 7, 9, 21, 30 y 42

GCP, se realizó otra con 60 puntos. Una muestra del proceso se encuentra en la figura 3.26 y los resultados alcanzados también se encuentran descritos en el capítulo 4.

Figura 3.26. Proceso de corrección de la imagen en pendiente media con 42 GCP



Fuente: El autor (2012)

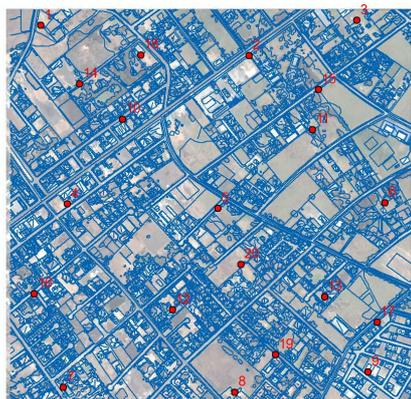
3.11 CONSISTENCIA ESPACIAL DE LAS IMÁGENES POR CG

A más de la revisión visual realizada y descrita en los resultados del proceso corrección geométrica (capítulo 4), tanto para las imágenes corregidas en la zona de pendiente baja, como para pendiente media (que incluye áreas con pendiente alta y pendiente alta excesiva), se generaron archivos de puntos para la evaluación, procediendo de la siguiente forma:

Creación de un shape de puntos, archivo de referencia, que contiene 20 puntos tomados de elementos cartográficos concordantes con la imagen de pendiente baja y otro shape de 20 puntos para los de pendiente media. Luego, para hacer la comparación se crearon sucesivamente para cada imagen otros shape, de 20 puntos para la imagen generada en pendiente baja con 7 GCP, para 9GCP, para 21 GCP, 30 GCP y 20 puntos más para la de 42 GCP. Continuando el mismo esquema para las imágenes de pendiente media, otros shape de 20 puntos para cada producto de 7 GCP, 9 GCP, 21 GCP, 30 GCP, 42 GCP y 60 GCP respectivamente. En resumen, se crearon 6 shape de puntos de los productos de baja pendiente y 7 shape de los de media. Por tanto, se pincharán 120 puntos en las imágenes de área baja y 140 puntos en las de media, un total de 260 puntos para realizar la evaluación.

Una vez creados los shape, se procede al pinchado de puntos en la cartografía e imágenes de pendiente baja, primero marcar los puntos identificables en la cartografía que concuerden con la imagen (puede ayudarse poniendo de fondo la imagen con mejor ajuste; ver figura 3.27).

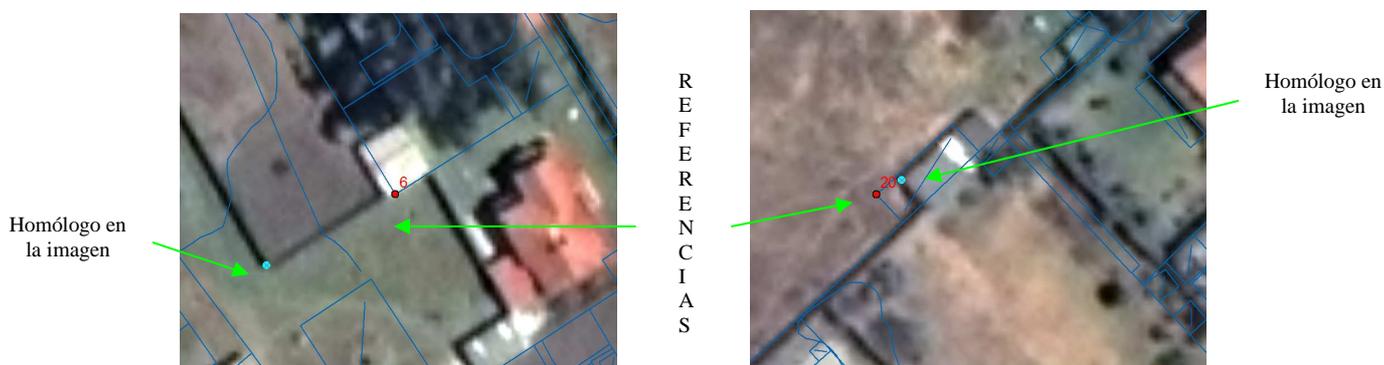
Figura 3.27. Puntos muestra de referencia para la evaluación de las imágenes generadas



Fuente: El autor (2012)

Luego marcar los puntos para la imagen generada con 7 GCP y así sucesivamente hasta marcar los puntos de la imagen de 42 GCP. Una muestra del procedimiento se observa en la figura 3.28.

Figura 3.28. Muestra de puntos marcados en la imagen y cartografía de referencia

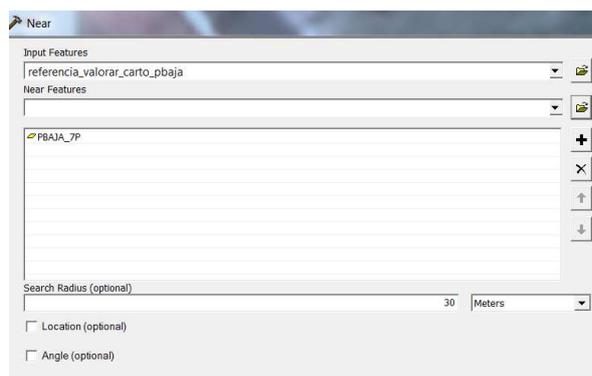


Fuente: El autor (2012)

Previo al cálculo de la distancia de cada punto vs. la referencia, en la tabla de atributos del archivo de referencia (puntos de la cartografía), adicionar campos que contendrán los

resultados de distancia. Una vez estandarizada dicha tabla, proceder al cálculo de la distancia de cada punto y de cada shape con la herramienta “Near” del ArcGis; un ejemplo de los parámetros ingresados se observa en la figura 3.29

Figura 3.29. Herramienta y parámetros de ingreso para la comparación de distancia



Fuente: El autor (2012)

De la misma forma se procede con la evaluación para los productos de pendiente media. Todos los resultados se encuentran en el capítulo 4.

3.12 CÁLCULO DEL NIVEL DE CONFIANZA.

Para el cálculo del nivel de confianza de la muestra evaluada, se utilizaron los estadísticos los estadísticos alcanzados en la evaluación de los productos, mediante la siguiente ecuación:

$$n = \frac{\sigma^2 t^{\alpha/2}}{\tau^2} \quad (\text{ecuación. 3.3})$$

En donde:

n = tamaño de la muestra, para todas las evaluaciones es igual a 20 puntos

σ = es el valor de la desviación estándar, el cual será utilizado para cada imagen corregida

$t^{\alpha/2}$ = es el valor que representa el área bajo la curva de la distribución t de Student (t_0)

τ = es el error permitido o tolerado en el proceso, igual a 1.5m

Los resultados alcanzados se encuentran descritos en el capítulo 4.

3.13 ORTOIMÁGENES Y ESTIMACIÓN DEL NÚMERO DE GCP

Como paso previo para la generación de las ortoimágenes, se puede estandarizar las coordenadas de referencia en un archivo .dat; cabe indicar, que dichas coordenadas en el proceso de corrección solamente tienen los atributos en Este y Norte, y para la generación de ortoimágenes se requiere adicionalmente el atributo de la altura.

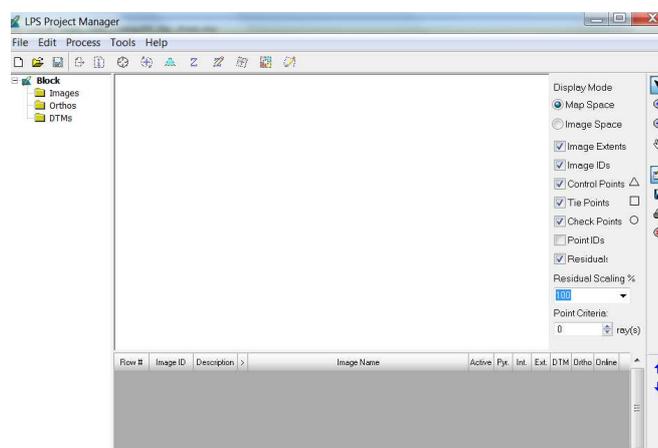
Para la obtención del atributo de altura, exportar las coordenadas Este y Norte a un archivo .dat, luego estas coordenadas pueden ser leídas en Excel, para posteriormente ser exportadas como tabla .dbf con la ayuda del ArcCatalog.

Cargar el MDE de la zona de pendiente baja en el entorno ArcMap, también leer las coordenadas registradas en la tabla .dbf en el mismo software y seleccionar la herramienta “Extract Values to Point” para la extracción de los valores de altura. Una vez obtenidos los valores requeridos, leer nuevamente las coordenadas en una hoja de Excel y exportar los registros de Este, Norte y Altura por separado a .dat; es decir se crearán 3 archivos.

Repetir el mismo proceso para la estandarización de las coordenadas de pendiente media y ahora iniciar con la generación de las ortoimágenes de pendiente baja y las correspondientes para pendiente media.

Arrancar el módulo LPS del programa ERDAS 2011 localizado en la pestaña Toolbox; en ese instante se abrirá la ventana LPS Project Manager, ilustrada en la figura 3.30.

Figura 3.30. LPS Project Manager



Fuente: El autor (2012)

Crear un nuevo proyecto con un nombre acorde a la imagen a corregir, seleccionar el modelo “Polynomial Based in Pushbroom” / “Generic Pushbroom y establecer el sistema de referencia del proyecto. Una vez creado el proyecto, cargar en la ventana LPS Project Manager la imagen a rectificar y el DEM_{CURVAS} de la zona de pendiente baja como se aprecia en la figura 3.31

Figura 3.31. Imagen de entrada y diagrama de procesos para la ortorectificación

Row #	Image ID	Description	Image Name	Active	Pyr.	Int.	Ext.	DTM	Ortho	Online
1	1		/maestria/hesit_unigis/estandarizacion/imagenes_img/05aug_03c		Green	Red	Red	Red	Green	Green

Fuente: El autor (2012)

Interpretando lo visualizado en la figura, los casilleros en verde son los procesos ejecutados y aceptados, mientras los de rojo indican cuáles son los que faltan; se debe seguir en orden cada proceso, saltándose el casillero DTM.

Seleccionar el casillero en rojo “Int.”, el cual accede a la ventana Generic Pushbroom Frame Editor que permite reconstruir la orientación interior de la imagen; escoger el nombre del sensor correspondiente (QuicBird), si no existe crear uno nuevo, así como se observa en la figura 3.32.

Figura 3.32. Orientación interior y creación de los parámetros para el sensor QuickBird

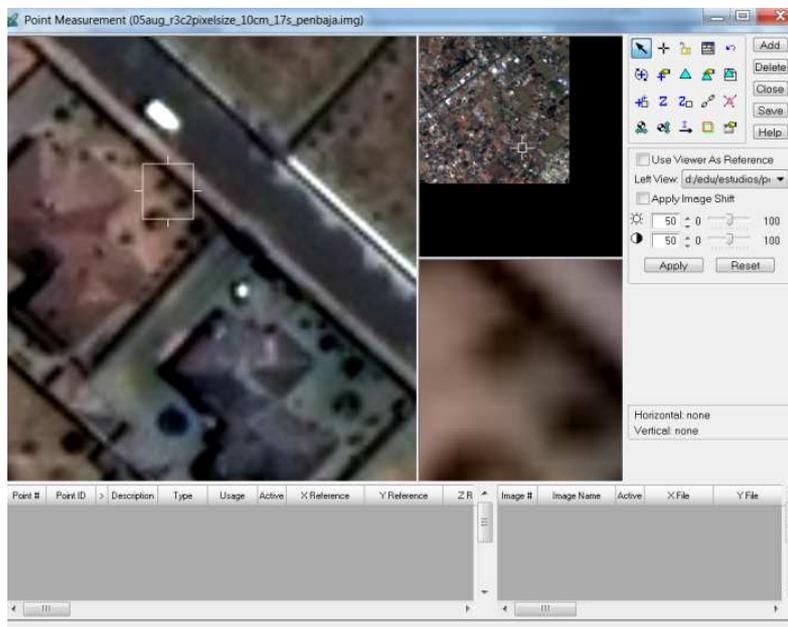


Fuente: El autor (2012)

Vale la pena mencionar, que este truco se utilizó para pasar la orientación interior, pero los parámetros ahí visualizados deben ser actualizados con los verdaderos que disponga QuicBird, ya que en esta versión de ERDAS no se incluyen.

Para efectuar la orientación exterior, escoger la herramienta Start point measurement tool, con su vista clásica, en ese momento se abrirá el entorno para el ingreso de los puntos de control con sus respectivas herramientas; observe la figura 3.33.

Figura 3.33. Entorno de trabajo para el marcado de puntos LPS

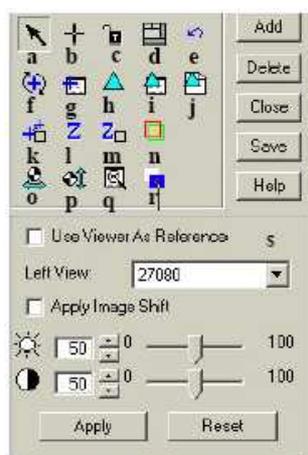


Fuente: El autor (2012)

Igual que el entorno de la corrección geométrica, tiene las ventanas de visualización con sus respectivas ampliaciones; en la parte inferior se destaca el área para ingreso de los

GCP, GCP de control, de paso o de chequeo; opciones para coordenadas en horizontal, vertical o “Full” en el que se incluye la altura (para los puntos de referencia escoger Control y Full); así mismo en la parte superior derecha se aprecia cada una de las herramientas necesarias para el proceso, las mismas que están identificadas en la figura 3.34.

Figura 3.34. Descripción del entorno Point Measurement



Nota: el significado de cada letra de la figura 3.21 será descrito en forma resumida, toda la información se encuentra en el HELP de ERDAS. **a:** permite mover los puntos digitalizados; **b:** para ingresar nuevos puntos; **c:** para bloquear y desbloquear la herramienta de trabajo; **d:** redistribuye las ventanas en caso de modificación; **e:** deshace la última acción; **f:** la opción para generar puntos Tie Point; **g:** link para establecer las propiedades del generador de Tie Point; **h:** elabora la aerotriangulación; **i:** propiedades de la triangulación; **j:** vínculo que permite guardar en un archivo de texto los resultados de la aerotriangulación; **k:** cuando estamos realizando ortofotos, este ícono activado permite que el programa interpole la posición del punto encontrado en la segunda fotografía aérea que esté visualizada en pantalla; **l:** actualiza la altura del punto seleccionado basándose en las alturas del DEM, éste se puede añadir con la herramienta **p**; **m:** si la herramienta está activa, mientras se ingresen los puntos, se actualiza el valor de la altura Z ;**n:**(para ortofotos) seleccionará todos los puntos comunes a las dos imágenes visualizadas en pantalla; **o:** se pueden anexar archivos de ayuda a la localización de puntos conocidos permitiendo a la vez obtener las coordenadas de éstos; **p:** podemos añadir archivos MDE de guía para la actualización de la Z; **q:** manipula las propiedades de la vista ;**r:** nos muestra un gráfico del proceso de orientación y los puntos entrados; **s:** aquí podemos variar el contraste y brillo de la imagen o imágenes en uso. Además nos permite habilitar la imagen de interés (en estudio) y en el caso del proceso de ortofotos nos permite la comunicación automática entre imágenes.

Fuente: Caimel (2002)

Para ingresar las coordenadas de referencia, primero adicionar los registros que correspondan al número de puntos de control del archivo .dat, luego importar la referencia en X (Este), la referencia en Y (Norte) y la referencia en Z (altura), tal como se observa en la figura 3.35.

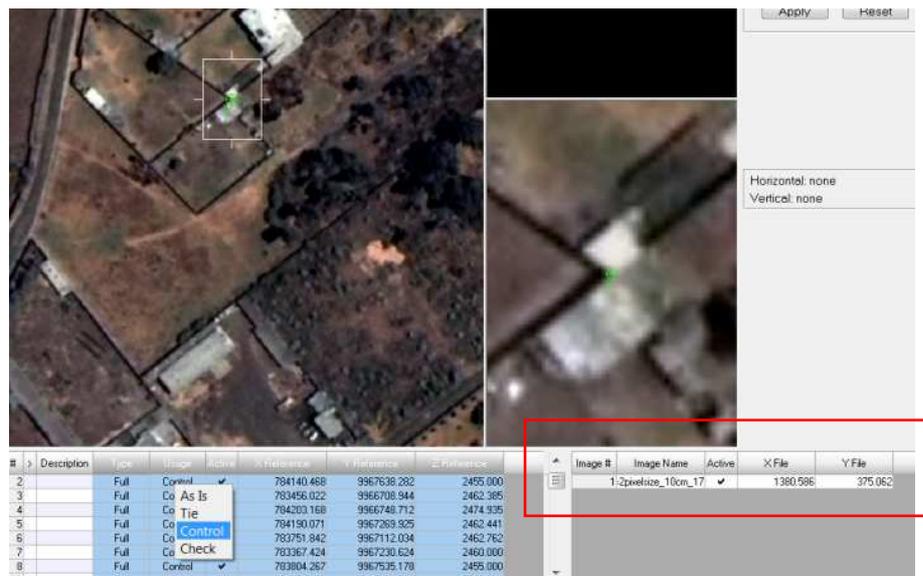
Figura 3.35. Importación de coordenadas de referencia al entorno Point Measurement

pt #	Description	Type	Usage	Active	X Reference	Y Reference	Z Reference
1		None	Tie	✓	783430.510	9967643.646	
2		None	Tie	✓	784140.468	9967638.282	
3		None	Tie	✓	783456.022	9967703.944	
4		None	Tie	✓	784203.168	9967742.712	
5		None	Tie	✓	784190.071	9967263.926	
6		None	Tie	✓	783761.842	9967112.034	

Fuente: El autor (2012)

Continuar con el ingreso (pinchado) de los puntos en la imagen, por tanto, escoger la herramienta “Create Point”, buscar la ubicación homóloga con la fuente de referencia y marcar el punto; en ese momento, en la parte inferior derecha del entorno de trabajo (figura 3.36), se visualizarán las coordenadas de imagen para ese punto.

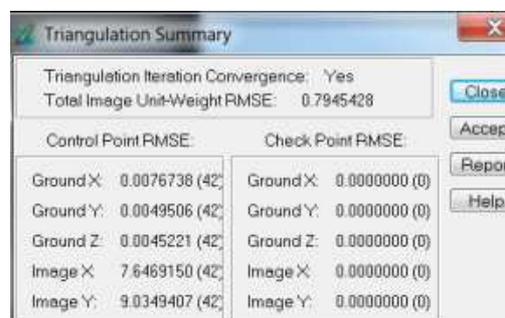
Figura 3.36. Marcación de los puntos para la ortoimagen



Fuente: El autor (2012)

De la misma manera, ingresar los demás puntos (no olvidar de que éstos aparezcan como Full y Control), luego correr la Aerotriangulación, en donde se debe superar la prueba de convergencia, como se aprecia en la figura 3.37.

Figura 3.37. Prueba de convergencia en la Aerotriangulación

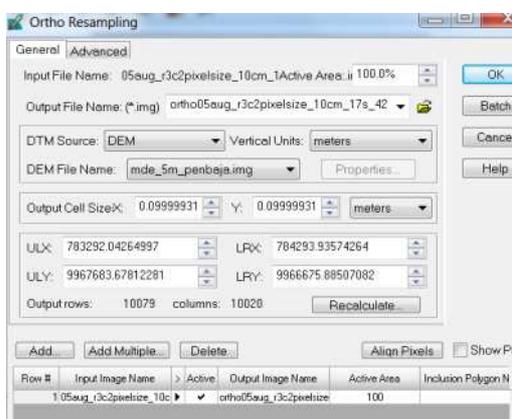


Fuente: El autor (2012)

Guardar y cerrar el entorno de trabajo de ingreso de puntos; se retorna a LPS Project Manager, como se cumplió con la orientación exterior, el diagrama de proceso en Ext. aparece en color verde.

Finalmente, correr la ortorectificación seleccionando el botón Ortho Resampling, poner como fuente de altura el DEM para la zona de pendiente baja, revisar que estén bien los tamaños de los píxeles, ingresar el nombre de salida y procesar la imagen. Ver figura 3.38

Figura 3.38. Parámetros de ingreso para etapa final de la ortorectificación de la imagen



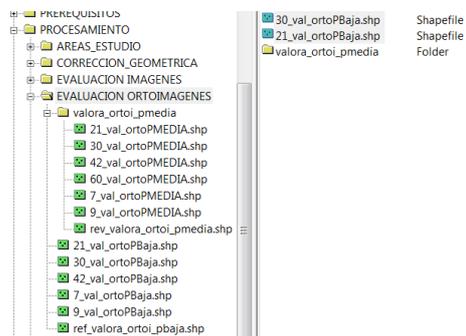
Fuente: El autor (2012)

Este mismo procedimiento, se debe seguir en el resto de pruebas de ortorectificación (generación de ortoimagen) con 7, 9, 21, 30 y n GCP para pendiente baja y con n puntos y pruebas para las Ortoimágenes de pendiente media. Los resultados se encuentran en el capítulo 4.

3.14 CONSISTENCIA ESPACIAL DE LAS ORTOIMÁGENES

La metodología seguida en este proceso, es similar a la descrita para la evaluación de las imágenes por corrección geométrica. En resumen, se crearon archivos shape de puntos, tanto para la cartografía de referencia, así como para cada producto (ver la figura 3.39), luego se marcaron 20 puntos en la cartografía de referencia y 20 puntos en los sitios homólogos en cada ortoimagen de diferente pendiente. En total se pincharon 260 puntos.

Figura 3.39. Creación de los insumos para la evaluación estadística de las ortoimágenes



Fuente: El autor (2012)

Finalmente, a través del uso de la herramienta de proximidad “Near” se calculó la distancia existente desde el punto de referencia hacia el homólogo identificado en cada ortoimagen; los resultados alcanzados se ilustran en el capítulo 4.

3.15 NIVEL DE CONFIANZA PARA LAS ORTOIMÁGENES

El procedimiento seguido es el mismo que se encuentra descrito para el cálculo del nivel de confianza de la muestra en la corrección geométrica; los insumos utilizados para este caso, son los estadísticos alcanzados en la evaluación de la consistencia espacial de las ortoimágenes. Los resultados obtenidos se encuentran en el siguiente capítulo.

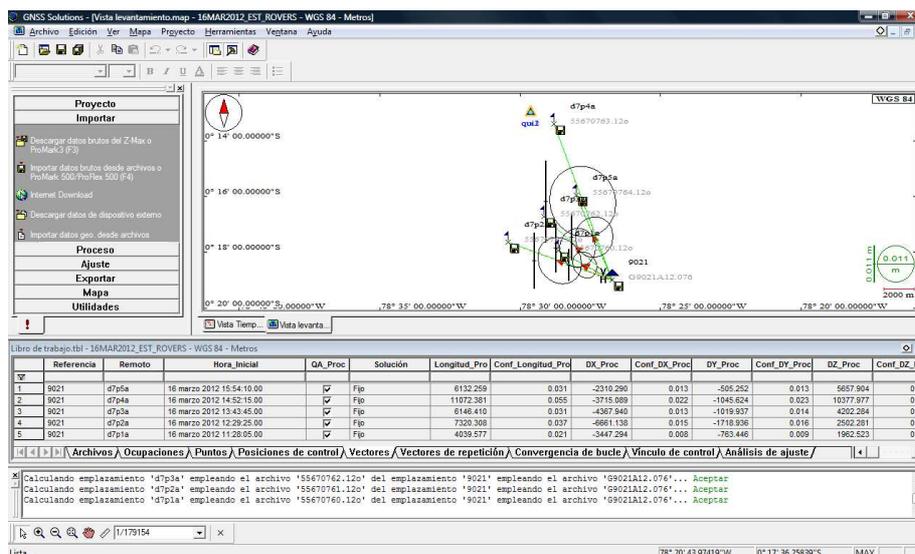
CAPÍTULO 4

RESULTADOS

4.1. RESULTADOS DE LOS PUNTOS GPS POSTPROCESADOS

En la figura 4.1, se visualiza una pantalla del Postproceso de líneas base realizado en el software GNSS Solutions; aquí encontrará los vectores calculados de los puntos GPS de la última sesión realizada el 16 de marzo de 2012 respecto a la base del “estadio” ESPE, incluye el tipo de solución (Fijo indica corrección de ambigüedades), distancia de la base al punto (expresada en metros), entre otros cálculos.

Figura 4.1. Postproceso líneas base – vectores calculados.



Fuente: el autor (2012)

En la misma sesión, seleccionando cada una de las pestañas inferiores, se puede observar el tiempo de ocupación de cada punto, las coordenadas y sus precisiones, ajuste, etc. En la figura 4.2 se observan las coordenadas de cada punto, conjuntamente con las precisiones relativas en horizontal y vertical.

Figura 4.2. Postproceso de líneas base – coordenadas y precisiones.

	Nombre	Descripción	Long.	Lat.	Altura elipse	Estatus	Limitaciones	Conf_Horz_Levt	Conf_Altura_Levt	Tipo	Advert
1	d7p1a	d7p1a	78° 28' 37.67700"	0° 17' 56.06423"S	2564.651	Procesado (estático)	Sin limitaciones	0.001	0.001	Punto registrado	<input type="checkbox"/>
2	d7p2a	d7p2a	78° 30' 25.64146"	0° 17' 38.44924"S	2856.967	Procesado (estático)	Sin limitaciones	0.001	0.001	Punto registrado	<input type="checkbox"/>
3	d7p3a	d7p3a	78° 29' 08.49467"	0° 16' 43.16336"S	2620.847	Procesado (estático)	Sin limitaciones	0.001	0.002	Punto registrado	<input type="checkbox"/>
4	d7p4a	d7p4a	78° 28' 47.98130"	0° 13' 22.16445"S	2749.338	Procesado (estático)	Sin limitaciones	0.001	0.001	Punto registrado	<input type="checkbox"/>
5	d7p5a	d7p5a	78° 27' 59.99468"	0° 15' 55.80649"S	2520.693	Procesado (estático)	Sin limitaciones	0.001	0.001	Punto registrado	<input type="checkbox"/>
6	9021		78° 26' 43.55207"	0° 18' 59.94235"S	2516.740	Estimado	&Fijo horizontal y vertical (34.648	19.600	Punto de control	<input type="checkbox"/>

Fuente: el autor (2012)

Finalmente, luego de procesar todas las líneas base, estandarizar los datos, eliminar aquellos puntos que no cumplen con las condiciones del proyecto, se elaboro la tabla 4.1, en la que se encuentran las coordenadas que servirán para valorar la cartografía.

Tabla 4.1. Elenco de coordenadas GNSS – GPS

PTO	ID	Sector	Solución	ESTE	NORTE	PH(m)	He	PV	ϕ	λ	Equipo
1	d1p1b	COLINA	fija	784922.901	9965112.739	0.007	2529.056	0.011	S0°18'55.14809"	078°26'25.04008"	trimble
2	d1p2a	PLAYA2	fija	785015.613	9966290.495	0.008	2527.496	0.013	S0°18'16.82600"	078°26'22.05281"	trimble
3	d1p4a	ALANGASI	fija	787918.430	9965884.336	0.01	2602.162	0.012	S0°18'30.01858"	078°24'48.23089"	trimble
4	d1p5b	TINGO	fija	784660.942	9968563.025	0.006	2466.59	0.011	S0°17'02.88593"	078°26'33.53272"	trimble
5	d1p5d	TINGO	fija	784660.606	9968562.845	0.009	2466.849	0.017	S0°17'02.89180"	078°26'33.54359"	trimble
6	d2p2a	MARIN	fija	777413.836	9975564.491	0.023	2820.436	0.044	S0°13'15.11465"	078°30'27.81033"	trimble
7	d3p2a	INTERVALLES	fija	784872.492	9972516.126	0.015	2415.637	0.021	S0°14'54.25993"	078°26'26.72192"	trimble
8	d4p3a	MERCED	fija	786096.871	9967733.902	0.009	2530.101	0.016	S0°17'29.85300"	078°25'47.11733"	trimble
9	d4p4a	AMAZONAS	fija	783238.377	9967389.710	0.01	2484.973	0.017	S0°17'41.07346"	078°27'19.50208"	trimble
10	d4p5a	BULEBAR	fija	784776.044	9964205.369	0.009	2538.992	0.012	S0°19'24.67294"	078°26'29.77921"	trimble
11	d4p6a	ROMEL	fija	783041.359	9966348.156	0.009	2491.425	0.012	S0°18'14.96507"	078°27'25.86202"	trimble
12	d4p7b	FAJARDO	fija	782677.956	9964876.588	0.007	2503.181	0.015	S0°19'02.84989"	078°27'37.59601"	trimble
13	d4p8a	MORA	fija	781540.195	9966054.873	0.009	2511.648	0.017	S0°18'24.51948"	078°28'14.37868"	trimble
14	d5p3a	CONOCOTO	L1RIOP	780819.205	9966929.320	0.01	2565.053	0.013	0° 17' 56.07181"S	78° 28' 37.68844"W	astech
15	d5p4a	ONTANEDA	L1RIOP	777479.286	9967471.962	0.009	2858.904	0.022	0° 17' 38.43945"S	78° 30' 25.64370"W	astech
16	d5p5a	PUENTE6	L1RIOP	779867.177	9969169.580	0.021	2621.508	0.025	0° 16' 43.18363"S	78° 29' 08.47520"W	astech
17	d6p1a	ANTENAS	fija	777780.490	9971249.232	0.001	3151.973	0.001	0° 15' 35.52781"S	78° 30' 15.93394"W	astech
18	d6p2a	PUANGASI	fija	779183.788	9972800.058	0.001	2958.851	0.001	0° 14' 45.05658"S	78° 29' 30.58683"W	astech
19	d6p3a	LUMBISI	fija	783632.967	9974409.479	0.001	2473.474	0.001	0° 13' 52.66198"S	78° 27' 06.79507"W	astech
20	d6p4a	CUMBAYA	fija	784930.969	9975547.635	0.001	2421.923	0.001	0° 13' 15.62152"S	78° 26' 24.84989"W	astech
21	d7p1a	CONOCOTO	fija	780819.559	9966929.553	0.001	2564.651	0.001	0° 17' 56.06423"S	78° 28' 37.67700"W	astech
22	d7p2a	ONTANEDA	fija	777479.355	9967471.661	0.001	2856.967	0.001	0° 17' 38.44924"S	78° 30' 25.64146"W	astech
23	d7p3a	PUENTE6	fija	779866.575	9969170.204	0.001	2620.847	0.002	0° 16' 43.16336"S	78° 29' 08.49467"W	astech
24	d7p4a	GUABO	fija	780502.436	9975347.310	0.001	2749.338	0.001	0° 13' 22.16445"S	78° 28' 47.98130"W	astech
25	d7p5a	ARMENIA	fija	781986.241	9970625.170	0.001	2520.693	0.001	0° 15' 55.80649"S	78° 27' 59.99468"W	astech
	BASE	ESPE	FIJA	784350.098	9964965.535	0.1301	2516.74	0.1593	0° 18' 59.94235"S	78° 26' 43.55207"W	astech
	MAX =					0.023		0.044			
	MIN =					0.001		0.001			
	RANGO =					0.022		0.043			
	MEDIA =					0.0072		0.0115			
	DESVIACIÓN ESTANDAR =					0.006		0.0101			
	ERROR =					0.1303		0.1597			

Fuente: el autor (2012)

Son 26 registros, el último corresponde a la base “estadio”, que fue postprocesada antes que los demás puntos GPS con el receptor de doble frecuencia, la base respecto a la EMC estación de monitoreo continuo “RIOP” tiene una precisión en horizontal de $\pm 13\text{cm}$ y vertical de $\pm 15.9\text{cm}$ aproximadamente; mientras que los puntos móviles respecto a la base

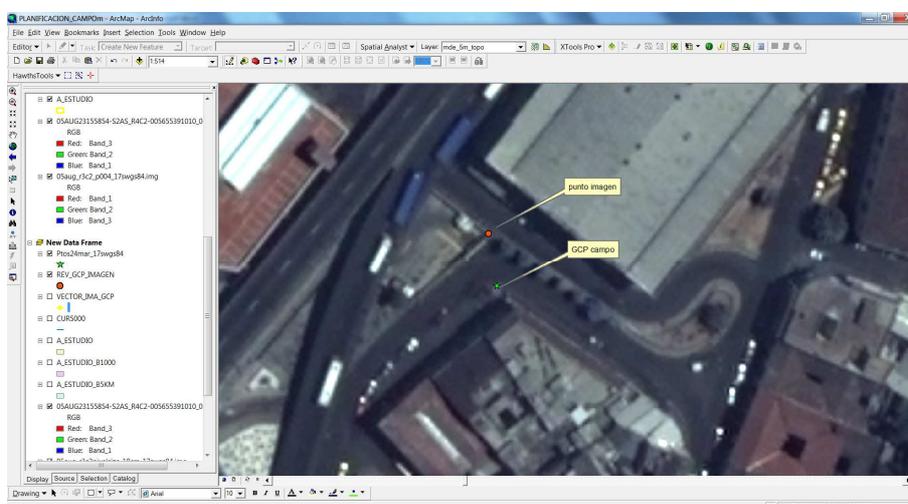
“estadio”, tienen como error máximo en horizontal $\pm 2\text{cm}$ y mínimo $\pm 1\text{mm}$, con una media de $\pm 7\text{mm}$ y desviación estándar $\pm 6\text{mm}$, y en vertical máximo $\pm 4.4\text{cm}$, mínimo $\pm 1\text{mm}$, con media de $\pm 1.1\text{cm}$ y desviación estándar de $\pm 1\text{cm}$. De esto se deduce por propagación de errores, que el error en horizontal de todos puntos es $\pm 13\text{cm}$ y $\pm 15.9\text{cm}$ en vertical.

Finalmente, en los encabezados de la tabla se observan: PTO que indica el orden del punto; ID es el identificador del punto (Ej. d1p1b, expresa la primera sesión (d1), primer punto (p1) y (b) la segunda toma del mismo punto), sector es nombre de la zona, solución “fija” indica que se corrigieron las ambigüedades y L1RIOP significa que el punto fue postprocesado con la EMC “RIOP”, también se incluyen las coordenadas Planas ESTE y NORTE con sus precisiones PH y PV en metros, la altura elipsoidal H_e , las coordenadas geodésicas en grados sexagesimales y por último, la marca del receptor GNSS utilizado.

4.2. RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN EN LA IMAGEN

Respecto a la evaluación visual de la imagen QuicBird, en términos de su corrimiento, en la figura 4.3 se puede evidenciar dicho traslado y justificar una parte de esta investigación, ya que este desplazamiento entre varios factores se debe al nivel de adquisición de la imagen (LV2A), así como también al área, pendiente, desnivel, etc.

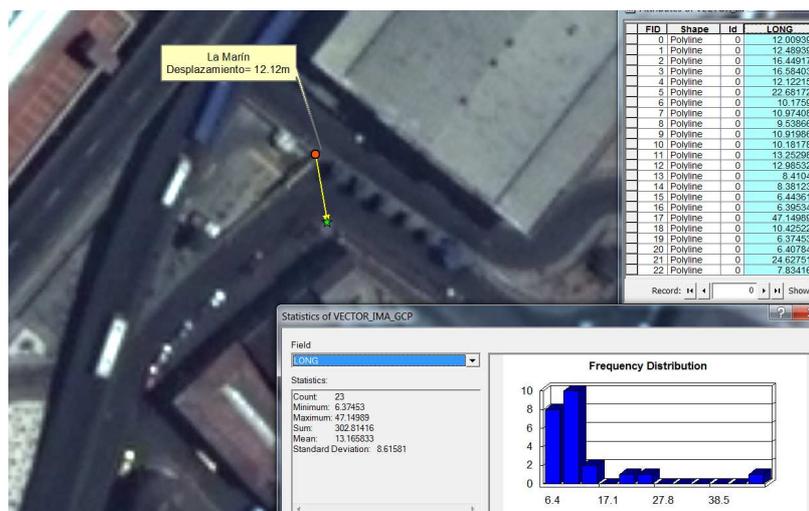
Figura 4.3. Desplazamiento visual de la imagen respecto a los puntos GPS calculados



Fuente: el autor (2012)

Como se mencionó en la metodología, se generaron vectores para calcular el desplazamiento y orientación aproximada. En la figura 4.4, se observa el vector existente en el sector de la Marín, los 23 registros de los vectores con sus correspondientes estadísticos.

Figura 4.4. Desplazamiento geométrico de la imagen respecto a los puntos GPS



Fuente: el autor (2012)

En el caso del sector de la Marín, el desplazamiento es de 12.12m con un azimut de 170° aproximadamente (sentido sur – este) y en términos generales se observa que la media es de ± 13.17 m con una desviación estándar de ± 8.6 m.

4 de los 23 vectores tienen la misma tendencia de orientación, mientras que los 19 restantes están alineados hacia el oeste.

4.3. RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN DE LA CARTOGRAFÍA

Dentro del análisis visual, se consideraron los elementos homónimos tanto de la cartografía para escala 1:1000 como para 1:5.000. En la figura 4.5 se encuentran dos ilustraciones que ejemplifican dichos desplazamientos.

Figura 4.5. Diferencia visual de los elementos existentes en las cartografías recopiladas



Fuente: el autor (2012)

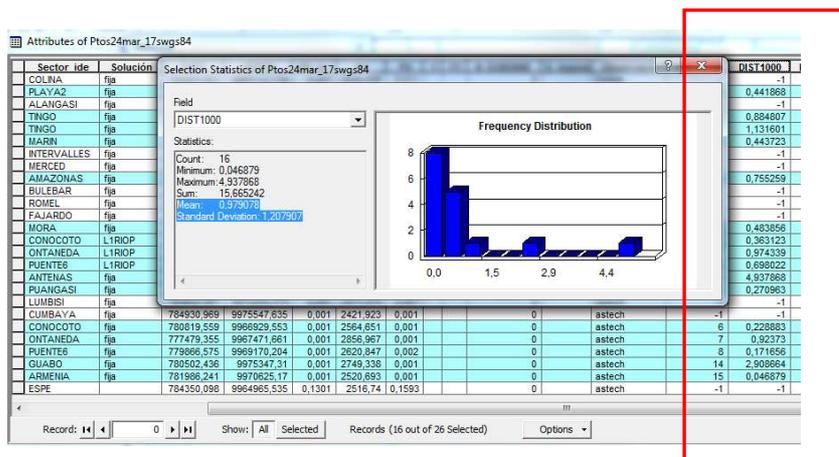
En la parte a de la figura 4.5, los desplazamientos son para 1 (3.8m), 2 (1.2m), 3 (2.6m), 4 (3.4m) y 5 (2.7m); mientras que en sección b hay en 1 (7.2m), (6.2m), 3 (6.7m), 4 (7.3m) y 5 (5.7m).

En total se observaron 38 muestras, el máximo desplazamiento llega a 7.4m, el mínimo a 1.2m, la media aritmética a 4.53m con una desviación estándar de 1.7m.

Con los antecedentes observados, no se sabe cuál de las dos cartografías es la que esta desplazada respecto a su verdadera posición en la Tierra o si son las dos. Por tanto, se continúa con la revisión de éstas vs. los puntos de control GPS obtenidos en campo.

En la metodología (capítulo 3), se indica que para valorar la cartografía para escala 1:1.000 se ingresó como referencia conocida los puntos GNSS postprocesados, mediante la herramienta “Near” con un radio de búsqueda de 10m; los resultados obtenidos y sus estadísticos se encuentran en la figura 4.6.

Figura 4.6. Comparación de la cartografía 1:1.000 vs. los puntos GPS de campo



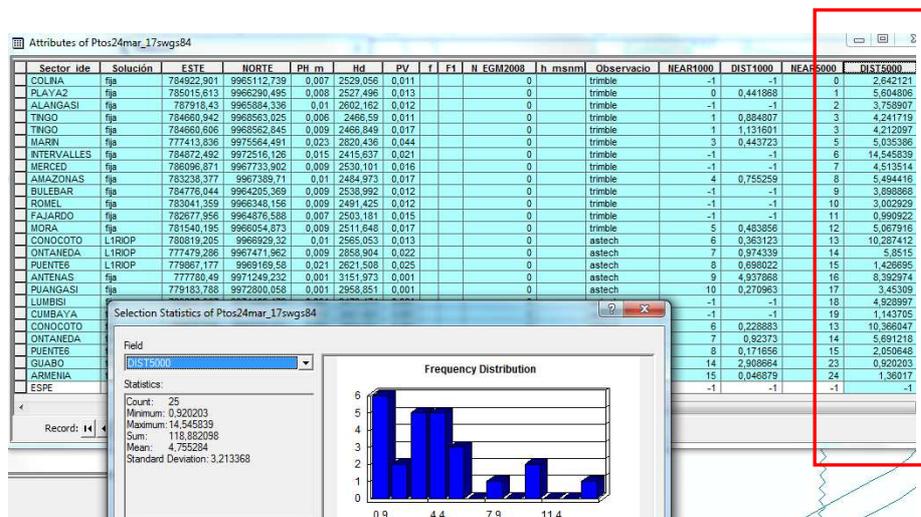
Fuente: el autor (2012)

Del total de puntos GNSS – GPS materializados en campo, 16 son utilizados para evaluar la cartografía para escala 1:1.000, las coordenadas restantes no tienen correspondencia con esta cartografía, es por eso que tienen asignado el valor de -1.

Estadísticamente, el desplazamiento promedio oscila ± 0.979 metros con una desviación estándar de ± 1.207 m; además se observa que el mayor desplazamiento es 4.94m y el menor 0.047m. Si se eliminan los dos valores máximos que se encuentran en los puntos Antenas y Guabo (puntos en ubicadas en áreas de laderas, de alta pendiente), se tendría una muestra de 14 puntos con un desplazamiento promedio de ± 0.558 m con desviación estándar de ± 0.324 m, lo que demuestra un notable cambio en cuanto a precisión de los estadísticos.

De la misma forma se procedió en la comparación para escala 1:5.000; los resultados obtenidos y sus estadísticos se lo recoge en la figura 4.7.

Figura 4.7. Comparación de la cartografía 1:5.000 vs. los puntos GPS de campo



Fuente: el autor (2012)

El número de muestras es 25, el desplazamiento promedio para escala 1:5.000 respecto a los puntos GPS es de $\pm 4.755\text{m}$ con una desviación estándar de $\pm 3.213\text{m}$, las máximas y mínimas diferencias son 14.545m y 0.920m respectivamente.

Ahora para la aceptación o rechazo de la prueba de hipótesis, se recopilan los estadísticos resultantes de la comparación de escala 1:1.000 vs. los puntos de control, ya que sus diferencias son inferiores a las de escala 1:5.000, lo que evidencia que esta última es la más desplazada respecto a su verdadera posición en la Tierra.

Considerando la ilustración de la figura 3.8. Prueba t – Student, cola derecha y representación del nivel de confianza, la prueba de hipótesis y las ecuaciones 3.1 y 3.2 respectivamente, los cálculos y resultados para esta prueba serían:

Hipótesis:

$$H_0: u \leq 0.3\text{mm} \times e$$

$$H_1: u > 0.3\text{mm} \times e$$

Datos:

$$n = 16$$

$$\bar{X} = u = \pm 0.979$$

$$s = \pm 1.207m$$

Ecuaciones:

$$PH_{(m)} = u_0 = 0.3mm \times e \quad \text{Si la escala es igual a 1:1.000; } u_{0(m)} = \pm 0.3m$$

$$s_x = \frac{s}{\sqrt{n}} = \frac{\pm 1.207}{\sqrt{16}} = \pm 0.302m$$

Prueba t de Student:

$$1 - \alpha = 90\% \text{ o } 0.9$$

$$\alpha = 0.1$$

$$v = n - 1 = 16 - 1 = 15 \text{ (grados de libertad)}$$

$$t_{\alpha} = 1.341$$

Deducción de $u_0 + t_{\alpha} s_x$:

$$0.3m \pm (1.341) (0.302)$$

$$0.3m \pm 0.405m$$

Resultado

$$H_0: 0.979 \leq 0.3m \pm 0.405m$$

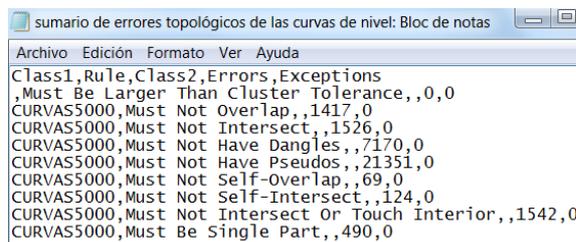
$$H_1: 0.979 > 0.3m \pm 0.405m$$

De la prueba de hipótesis realizada, se evidencia que la hipótesis alternativa (H_1) es la que se cumple; por tanto (H_0) se rechaza.

4.4. RESULTADOS DE LA VALIDACIÓN DE CURVAS DE NIVEL

En cuanto a la consistencia entre curvas de nivel, todas las curvas son consistentes, aunque en estas se encontraron curvas sobrepuestas, desuniones, etc. Para corregir dichas observaciones, en la metodología se indica que se realizaron algunos procesos como por ejemplo la incorporación de reglas topológicas para evaluar las relaciones espaciales de los elementos. Luego de ser validadas dichas reglas, dentro de las propiedades del archivo, se generó un sumario de errores, cuyos resultados se observan en la figura 4.8.

Figura 4.8. Errores topológicos de las curvas de nivel



```

sumario de errores topológicos de las curvas de nivel: Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
Class1,Rule,Class2,Errors,Exceptions
,Must Be Larger Than Cluster Tolerance,,0,0
CURVAS5000,Must Not Overlap,,1417,0
CURVAS5000,Must Not Intersect,,1526,0
CURVAS5000,Must Not Have Dangles,,7170,0
CURVAS5000,Must Not Have Pseudos,,21351,0
CURVAS5000,Must Not Self-Overlap,,69,0
CURVAS5000,Must Not Self-Intersect,,124,0
CURVAS5000,Must Not Intersect Or Touch Interior,,1542,0
CURVAS5000,Must Be Single Part,,490,0

```

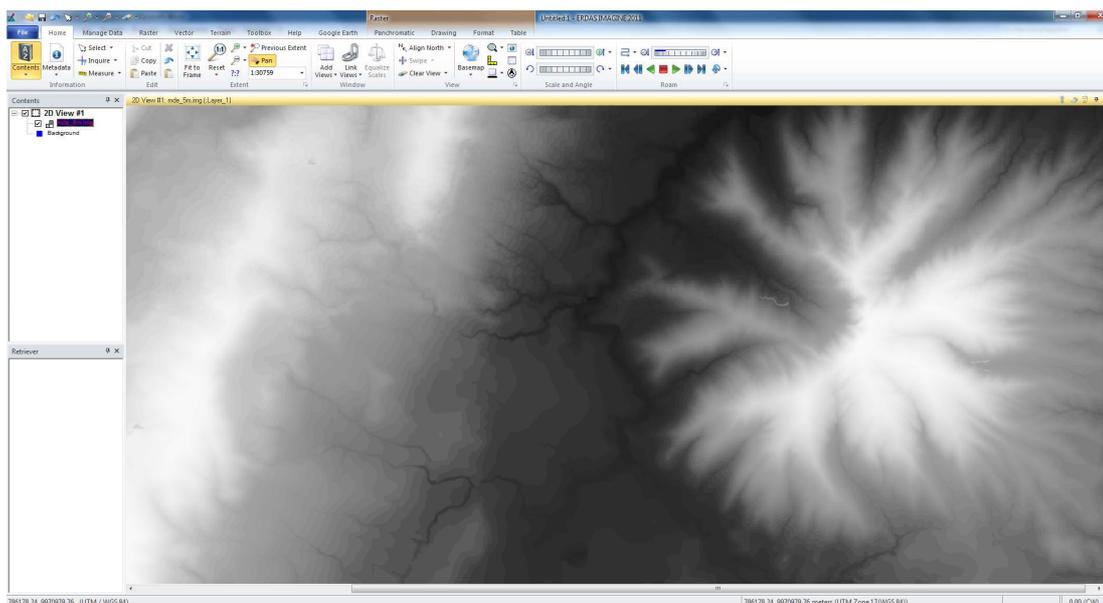
Fuente: el autor (2012)

Se contabilizaron 33689 inconsistencias, que pueden ser errores o excepciones. Finalmente, se realizaron las correcciones en el ArcMap y el archivo depurado es aquel utilizado para generación del Modelo Digital de Elevaciones, cuya metodología se detalla en el capítulo 3.

4.5. RESULTADOS Y REVISIÓN DEL MDE_{CURVAS}

En la figura 4.9, se observa una porción del modelo digital resultante, MDE_{CURVAS}, generado a través de curvas de nivel, con tamaño de píxel 5m en el software ERDAS, versión 2011.

Figura 4.9. Modelo Digital de Elevaciones generado con curvas de nivel cada 5m.



Fuente: el autor (2012)

En cuanto a los resultados de la comparación de los Modelos Digitales de Elevaciones, en tabla 4.2 se observan los cálculos:

Tabla 4.2. Diferencias de altura de los DEM del área de estudio preliminar

PTO	ALTURA DEMcurvas (1)	Altura DEMtopo (2)	Altura DEM SRTM (3)	Dif. DEM (1) y (2)	Dif (1) y (3)
1	3132.89	3132.48	3158	0.40	25.11
2	2510.86	2510.95	2524	0.08	13.14
3	2329.59	2329.55	2329	0.04	0.59
4	2841.06	2841.59	2848	0.54	6.94
5	3045.00	3046.65	3043	1.65	2.00
6	2323.60	2314.09	2311	9.51	12.60
7	2487.71	2487.47	2480	0.24	7.71
8	2839.20	2840.03	2842	0.83	2.80
9	2837.53	2837.85	2851	0.32	13.47
10	2465.00	2464.75	2467	0.25	2.00
11	3022.17	3022.29	3030	0.12	7.83
12	2575.00	2573.17	2577	1.83	2.00
13	2466.77	2466.52	2472	0.24	5.23
14	2535.89	2535.71	2541	0.19	5.11
15	2870.16	2870.01	2862	0.15	8.16
16	2964.72	2964.79	2967	0.07	2.28
17	2607.73	2608.05	2635	0.32	27.27
18	2509.92	2509.67	2510	0.25	0.08
19	2627.54	2627.75	2620	0.21	7.54
20	2642.97	2643.17	2647	0.21	4.03
21	2537.19	2536.94	2537	0.25	0.19
22	3069.51	3069.37	3067	0.14	2.51
23	2904.14	2904.30	2897	0.16	7.14
24	3032.84	3033.07	3015	0.23	17.84
25	2856.06	2855.99	2850	0.07	6.06
26	2495.35	2495.06	2487	0.30	8.35
27	2316.71	2313.68	2322	3.03	5.29
28	2793.78	2793.83	2802	0.05	8.22
29	2360.96	2361.87	2367	0.91	6.04
30	2843.97	2844.78	2865	0.81	21.03
31	2457.87	2457.80	2462	0.07	4.13
32	2571.55	2571.30	2589	0.24	17.45
MIN =				0.04	0.08
MAX =				9.51	27.27
MEDIA =				0.74	8.13
DESV. ESTÁNDAR =				1.69	6.93

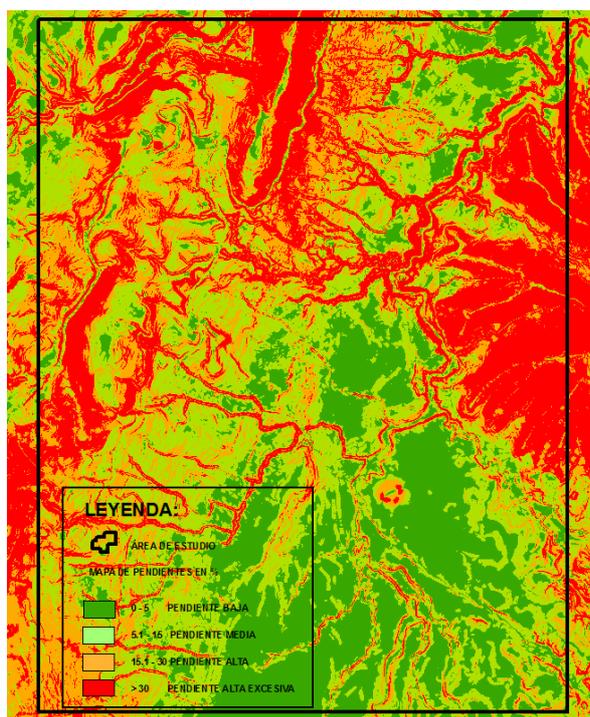
Fuente: el autor (2012)

Interpretando los resultados, se puede ver que la diferencia en altura de generar un DEM con ERDAS y ArcGIS con los métodos descritos en la metodología, es mínima, la media de la diferencia de altura es $\pm 0.74\text{m}$ con una desviación estándar de $\pm 1.69\text{m}$; mientras que comparando la altura del DEM_{CURVAS} vs. la del DEM SRTM, se encuentran como media $\pm 8.13\text{m}$ y desviación estándar ± 6.93 .

4.6. RESULTADOS DEL MAPA DE PENDIENTES

El mapa de pendientes resultante, ilustrado en la figura 4.10, es aquel generado con los algoritmos del programa ArcGis, con una reclasificación de 4 clases en función de los propósitos de este estudio.

Figura 4.10. Pendientes del área de estudio preliminar



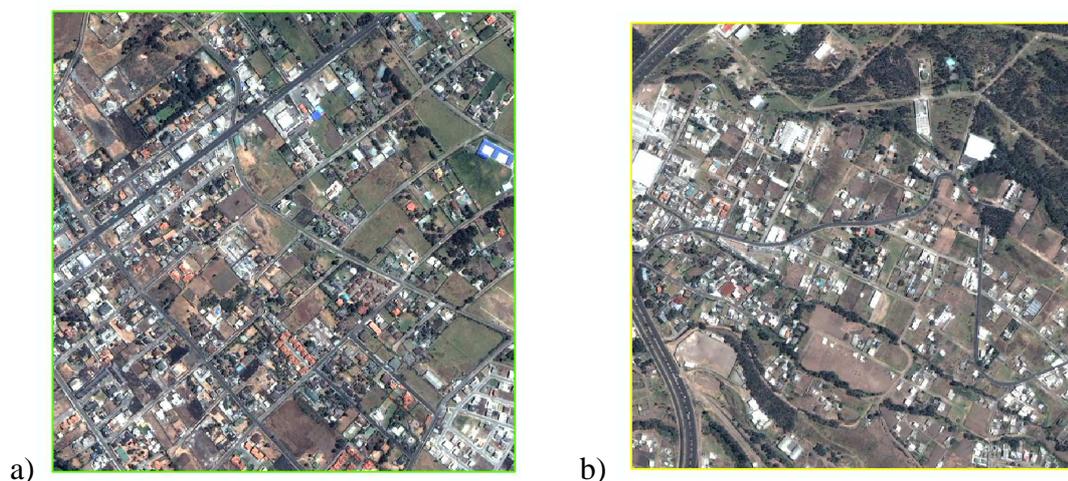
Fuente: el autor (2012)

Si se observan los distintos tonos, interpretándolos y asociando al sector de la zona preeliminar de estudio, se apreciará en la parte central y hacia el sur este, que existe la mayor cantidad de pendiente baja (porción de zona plana en el valle de los chillos), mezclada ligeramente con pendiente media y unas mínimas franjas de pendiente alta y alta excesiva (que indican las quebradas y causes de los ríos); también, se aprecia en los demás sectores, pequeñas áreas con pendiente media, mezclados con espacios menores de pendiente alta y alta excesiva; y así mismo, si se habla de pendiente alta excesiva, se ve en el área preeliminar en las zonas oriental y occidental, una gran cantidad que corresponden a la Loma de Puangasí y al Ilaló respectivamente.

4.7. RESULTADOS DEL ÁREA DE ESTUDIO DEFINITIVA

En la figura 4.11, se observará las imágenes recortadas para la zona de pendiente baja (a) y pendiente media (b).

Figura 4.11. Áreas de estudio, pendiente baja y media



Fuente: el autor (2012)

Ligeramente interpretando, en la zona de pendiente baja, se observa una alta densidad de infraestructura urbana y vial, que concuerda muy bien con la función de la pendiente para uso urbano mencionado en el capítulo 2; mientras que en la de pendiente media, ya hay evidencias de inclinación de la superficie con relación al horizonte (observar las áreas de bosque y autopista “General Rumiñahui” como ejemplos).

4.8. RESULTADOS DE LA CG EN PENDIENTE BAJA

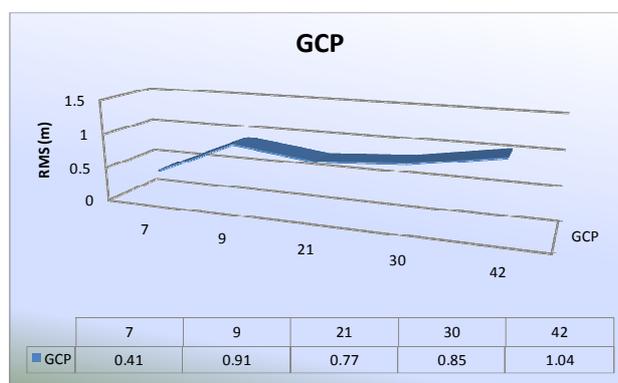
Los resultados observados en este proceso de corrección, serán representados en conjunto para los 7, 9, 21, 30 y 42 puntos. Se comenzará con la tabla 4.3, que contiene el resumen estadístico del Error Cuadrático Medio (RMS) y la gráfica 4.1, en donde se aprecia la distribución del RMS en función del número de puntos GCP utilizados.

Tabla 4.3. Error cuadrático medio de las correcciones geométricas en pendiente baja

# de GCP	RMS promedio (m)
7	0.41
9	0.91
21	0.77
30	0.85
42	1.04

Fuente: el autor (2012)

Gráfico 4.1. Error Cuadrático Medio vs. los Puntos de Control en pendiente baja



Fuente: el autor (2012)

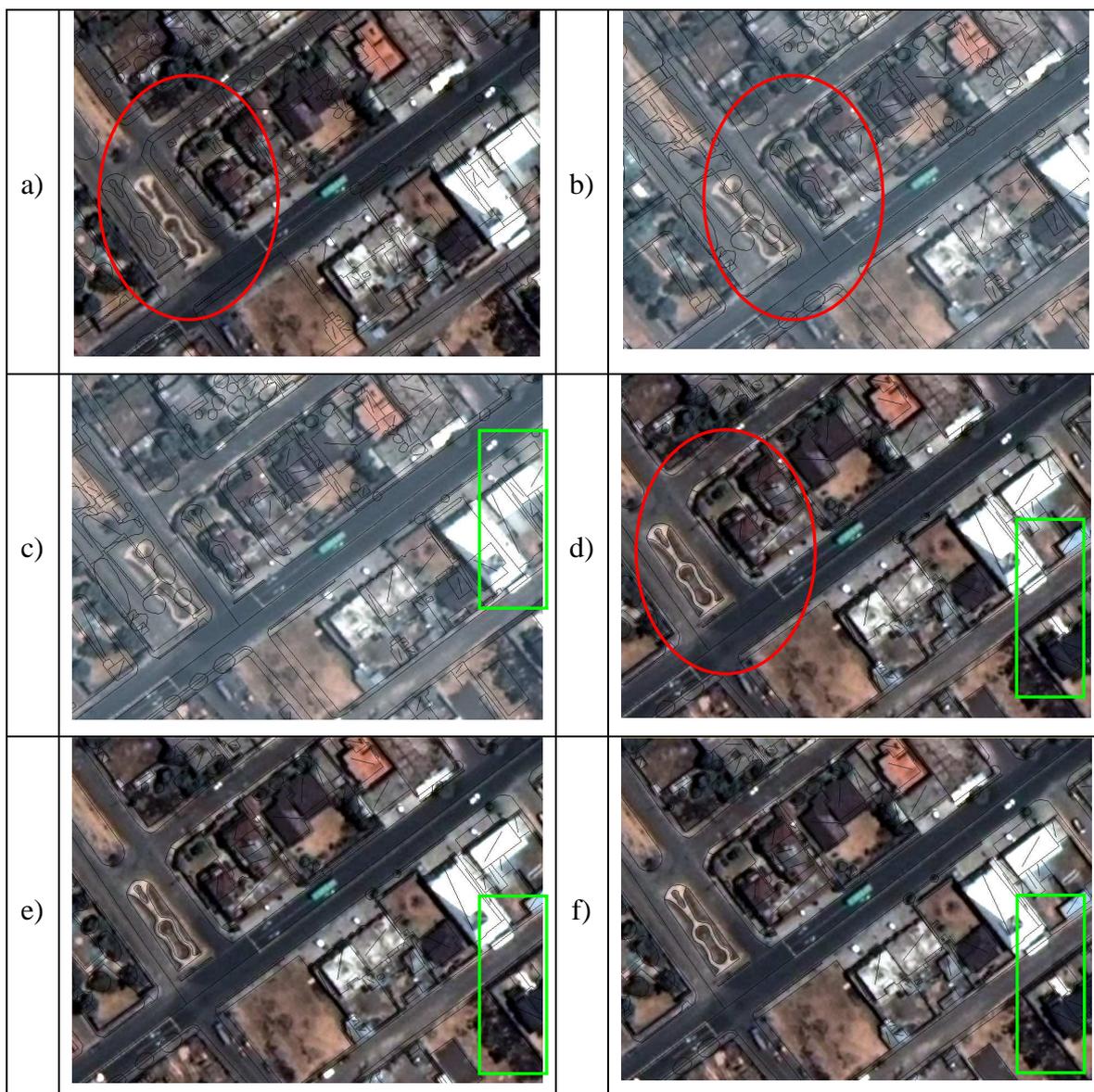
Se valora que el RMS medio con 7 puntos, es menor que el RMS medio de los demás puntos, cuando se ingresan 9 GCP el RMS también aumenta, en casi el doble, lo que indica que la distribución y aumento de 2 puntos influyen notablemente en los estadísticos y que con 7 GCP posiblemente solo se está ajustando la geometría en ciertos sectores de la imagen.

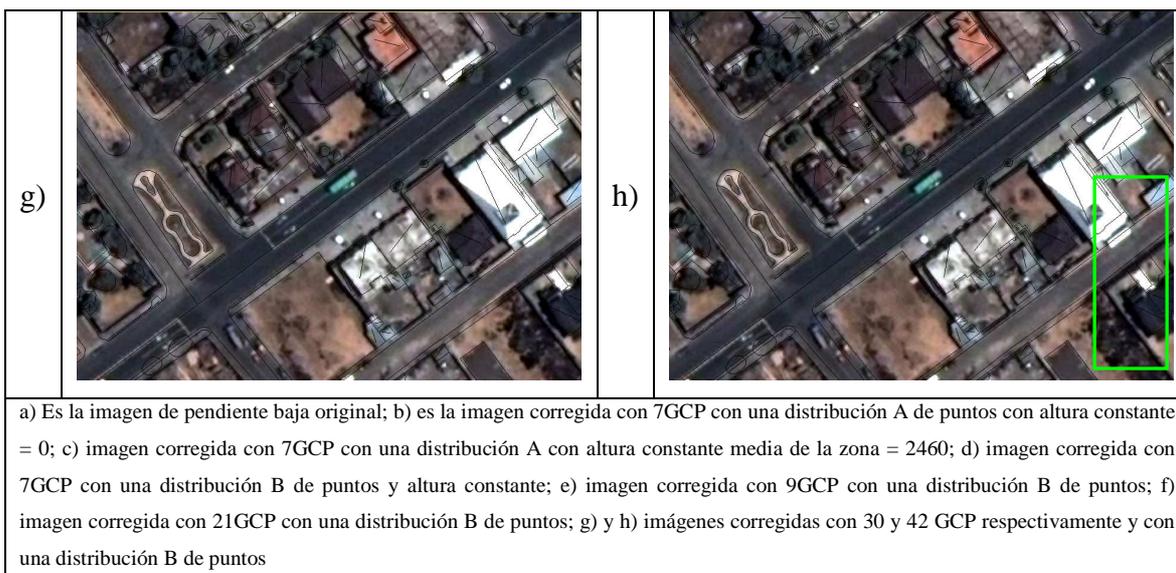
Al pasar a 21 GCP, disminuye el RMS a 0.77m, y al ingresar 30 GCP, ligeramente aumenta el RMS respecto a 21GCP, y con 42 asciende hasta 1.04m; lo que hace presumir que el punto de contraste del RMS se encuentra cerca de los 21 GCP. Aunque esta deducción de RMS, nos indica el comportamiento de los puntos contabilizados en la imagen respecto a la referencia (cartografía), y aun falta ver con qué número de GCP se ajusta la imagen respecto a la cartografía.

Dentro de las valoraciones visuales realizadas para ver con cuántos GCP se ajusta la imagen, se escogieron al azar dos áreas de ejemplo, en ambas la escala de visualización fue

1:700 y para cada área se observó la imagen vs. la cartografía; primero se visualizó la imagen original (el antes), y posteriormente cada imagen corregida (dependiente del número de GCP). En la tabla 4.4 se ilustra el primer ejemplo:

Tabla 4.4. Ejemplo 1, comparación de la imagen de pendiente baja con la cartografía





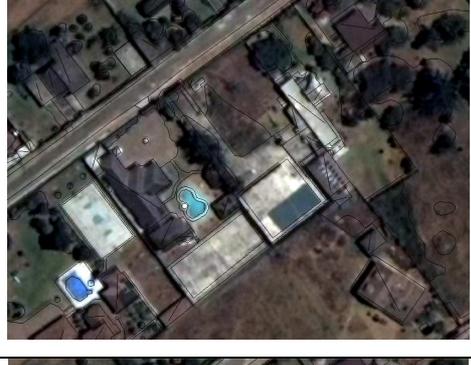
Fuente: El autor (2012)

Observaciones:

- Si se revisa la imagen y cartografía de la imagen original (a), con la primera corrección con 7 GCP y una distribución A de puntos (b), se verá que en que la posición de la cartografía vs. la imagen ha cambiado de oeste a este (izquierda a derecha).
- La imagen c) vs. la (b), son idénticas; entonces el poner la altura promedio de la zona o la altura 0 no ha influido en este proceso ejemplo.
- La (d) 7GCP con distribución B vs. la original y (b) y (c), se aprecia que la imagen calza bien con la cartografía en la zona ovalada, aunque en el extremo inferior izquierdo (recuadro rectangular) hay una ligera desviación. Esto demuestra que la revisión del ajuste depende de la zona de observación, de la cercanía al punto pinchado, de la distribución, etc.
- En la imagen (e) de 9GCP con distribución B de puntos, es muy parecido el ajuste con la de 7GCP, aunque hay una mínima desviación de la imagen en el recuadro ovalado, hay una mejora el ajuste en el área del recuadro rectangular.
- Mientras que con 21, 30 y 42 GCP, la imagen se ajusta muy bien con la cartografía.

Ahora, se revisará el segundo ejemplo, que corresponde a otra ubicación en la imagen de pendiente baja; ya en esta segunda prueba se observa (ver tabla 4.5) la variación existente con pocos GCP y con más GCP, entre otras situaciones:

Tabla 4.5. Ejemplo 2, comparación de la imagen de pendiente baja con la cartografía

a)		b)	
c)		d)	
e)		f)	
g)		h)	
a) Es la imagen de pendiente baja original; b) es la imagen corregida con 7GCP con una distribución A de puntos con altura constante			

= 0; c) imagen corregida con 7GCP con una distribución A con altura constante media de la zona = 2460; d) imagen corregida con 7GCP con una distribución B de puntos y altura constante; e) imagen corregida con 9GCP con una distribución B de puntos; f) imagen corregida con 21GCP con una distribución B de puntos; g) y h) imágenes corregidas con 30 y 42 GCP respectivamente y con una distribución B de puntos

Fuente: el autor (2012)

Observaciones del segundo ejemplo para pendiente baja:

- Para este ejemplo observando la imagen original (a) vs. la imagen (b) y (c), se observa un ya la existencia de un ajuste con el ingreso de 7 GCP.
- Revisando las imágenes (c) y (d), ambas de 7 GCP con diferencia en la distribución de puntos, la imagen (d) que tiene una mejor distribución, se encuentra desplazada respecto a la cartografía. Cabe resaltar, que el desplazamiento dado en este ejemplo es menor al observado en el ejemplo 1 y da a notar que la imagen (c) esta mejor ajustada ya que cerca de esa escena debió haber estado un GCP antes de la corrección.
- En la imagen (e) con 9 GCP, se visualiza una mejora del ajuste de la imagen respecto a la cartografía, aunque existe desplazamiento, se puede dar cuenta que al aumentar los puntos de control poco a poco la imagen toma su posición con concordancia a la fuente.
- Ya en las imágenes (f), (g) y (h), se cualifica un buen ajuste con respecto a la cartografía; aun así, en la etapa de revisión de la coincidencia espacial se afianzará estos análisis.

4.9. RESULTADOS DE LA CG EN PENDIENTE MEDIA

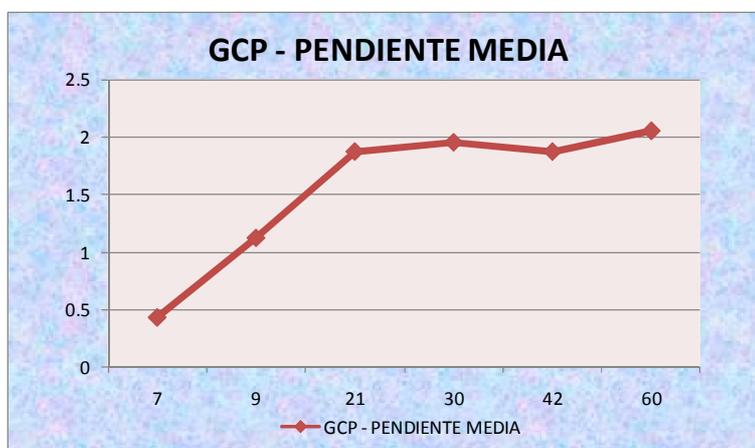
Los resultados observados en este proceso de corrección, también serán representados en conjunto para los 7, 9, 21, 30 42 y 60 puntos GCP. En ese sentido, revisar la tabla 4.6 con el resumen estadístico del Error Cuadrático Medio (RMS) y la gráfica 4.2, de la distribución del RMS en función del número de puntos GCP utilizados.

Tabla 4.6. Error cuadrático medio de las correcciones geométricas en pendiente media

# de GCP	RMS promedio (m)
7	0.43
9	1.12
21	1.87
30	1.95
42	1.87
60	2.05

Fuente: el autor (2012)

Gráfico 4.1. Error Cuadrático Medio vs. los Puntos de Control en pendiente baja



Fuente: el autor (2012)

Se observa que el RMS tiene una alta variación de 7 GCP a 21 GCP, luego de eso comienza una misma tendencia al aumentar los puntos, ligeramente aumenta con 30 GCP, levemente disminuye con 42 GCP y asciende muy poco en 60 GCP. Al parecer el rango de inflexión de estos puntos oscila desde los 30 a los 42 GCP aproximadamente. Estas variaciones dan a notar que la pendiente es un factor muy importante a considerar, ya en la imagen existe esta característica en un 50% de la imagen, el resto es una combinación de pendiente media con pendiente alta y alta excesiva.

En la valoración visual de las imágenes corregidas para pendiente media, se consideraron los mismos criterios establecidos para las imágenes anteriores, así mismo con dos ejemplos. En la tabla 4.7 se aprecian las pruebas realizadas en el ejemplo 1

Tabla 4.7. Ejemplo 1, comparación de la imagen de pendiente media con la cartografía

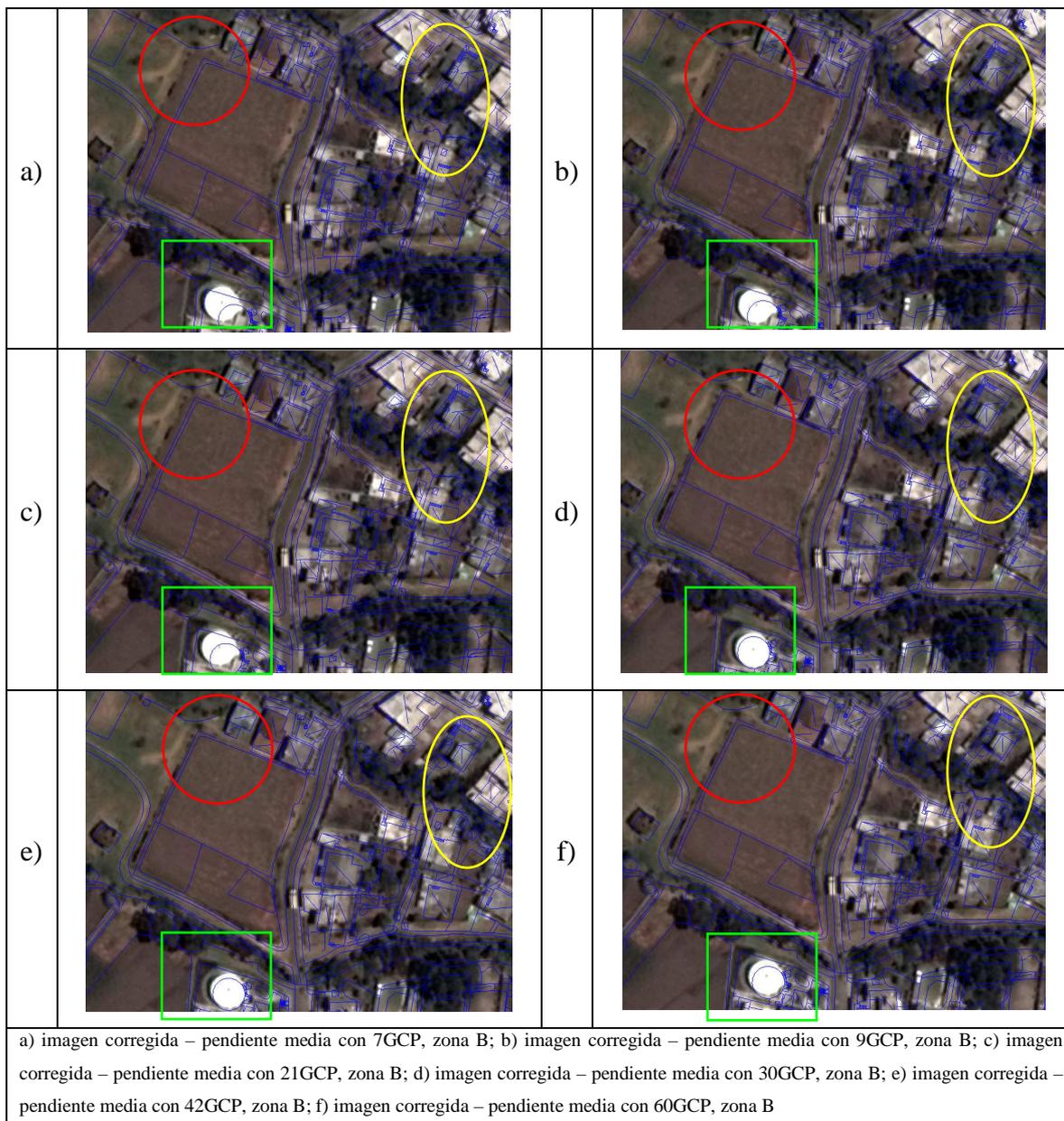
a)		b)	
c)		d)	
e)		f)	
<p>a) imagen corregida – pendiente media con 7GCP, zona A; b) imagen corregida – pendiente media con 9GCP, zona A; c) imagen corregida – pendiente media con 21GCP, zona A; d) imagen corregida – pendiente media con 30GCP, zona A; e) imagen corregida – pendiente media con 42GCP, zona A; f) imagen corregida – pendiente media con 60GCP, zona A</p>			

Fuente: el autor (2012)

Como se desprende en esta tabla, el mejor ajuste se da a partir de los 21 GCP, y se evidencia que luego de los 30 GCP la imagen se sitúa muy bien con la cartografía.

Ahora, se revisará el segundo ejemplo ilustrado en la tabla 4.8, que corresponde a otra ubicación en la imagen de pendiente media; aquí en este sector ya se tiene una combinación de pendiente alta (en su mayoría) y pendiente alta excesiva.

Tabla 4.8. Ejemplo 2, comparación de la imagen de pendiente media con la cartografía



Fuente: el autor (2012)

En base a los recuadros representados por círculo (rojo), rectángulo (verde) y óvalo (amarillo), se pueden hacer las siguientes observaciones:

- En términos generales para este ejemplo, ninguna de las imágenes se ha podido ajustar bien a la cartografía.

- En las áreas de pendiente media (círculo rojo y óvalo amarillo) se observa que a partir de los 30 GCP hay un ajuste respecto a la cartografía, esta observación también se aprecia hasta los 60 GCP.
- Si se visualiza el recuadro de forma rectangular (verde), se encontrará una cubierta circular en forma de bóveda; entonces la imagen no se ha podido ajustar a la cartografía, ya sea por la pendiente, este mal realizado el vector, por la corrección debido al relieve, etc.

4.10. RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN DE LAS IMÁGENES POR CG

En la tabla 4.9, se encuentran las distancias calculadas y los estadísticos (Max, Min, Media y Desviación Estándar) desde los puntos de referencia (cartografía) a cada uno de los puntos homólogos de las imágenes generadas con 7 GCP y hasta con 42 GCP en el caso de los productos de pendiente baja.

Tabla 4.9. Resultados de la consistencia espacial de las imágenes en pendiente baja

Punto PB	DIST7GCP	DIST9GCP	DIST21GCP	DIST30GCP	DIST42GCP
1	5.812	0.624	0.332	0.196	0.438
2	8.871	0.371	0.448	0.448	1.190
3	0.936	0.712	1.380	0.646	1.490
4	16.162	1.380	0.856	1.096	1.475
5	2.338	2.532	1.246	0.531	0.383
6	17.924	0.917	1.164	0.773	0.960
7	2.914	0.706	0.706	0.196	1.096
8	17.822	1.198	1.054	0.666	0.979
9	0.767	0.383	0.383	0.496	1.380
10	1.620	1.787	1.187	0.572	1.096
11	3.528	2.061	1.566	1.377	1.006
12	5.992	2.190	1.242	1.132	0.579
13	1.832	1.656	1.529	1.595	0.907
14	5.020	0.979	0.522	0.680	0.572
15	2.093	1.444	1.529	1.377	0.718
16	23.152	0.712	0.866	0.587	0.866
17	8.204	1.264	1.278	1.540	1.962
18	8.407	1.071	0.840	0.646	0.725
19	9.892	1.220	0.196	0.556	0.237
20	3.477	2.237	1.037	0.712	0.680
Max=	23.152	2.532	1.566	1.595	1.962
Min=	0.767	0.371	0.196	0.196	0.237
Media=	7.338	1.272	0.968	0.791	0.937
Desv.Stand=	6.399	0.619	0.414	0.407	0.414

Fuente: el autor (2012)

Para la lectura de la tabla considerar en PB (pendiente baja), el número del punto (Ej. número 1), y el resto de columnas es la distancia (Ej. para la imagen generada con 7 GCP, la distancia es igual a 5.812m).

Recordando que para cartografía a escala 1:5.000 el error aproximado en la planimetría es $\pm 1.5\text{m}$, y si se observa la media y la desviación estándar de los resultados, se verá que las imágenes generadas con 21, 30 y 42 GCP cumplen con este planteamiento, con 9 GCP casi se alcanza, pero con 7 GCP, no.

Relacionando los datos con los obtenidos para el Error Cuadrático Medio (RMS), el RMS permite darse cuenta de que tan dispersos están las coordenadas ingresadas de los puntos en el proceso de georeferenciación; aquí se encuentran valores entre $\pm 0.41\text{m}$ con 7GCP hasta $\pm 1.04\text{m}$ con 42 GCP. Esto enseña, entre varias cosas, que no solo un RMS bajo es importante para una evaluación de la cartografía.

Para los productos de pendiente media, los resultados alcanzados se encuentran en la tabla 4.10

Tabla 4.10. Resultados de la consistencia espacial de las imágenes en pendiente media

Puntos PM	DIST7GCPM	DIST9GCPM	DIST21GCPM	DIST30GCPM	DIST42GCPM	DIST60GCPM
1	1.844	2.574	3.513	1.515	1.162	0.579
2	7.216	8.695	6.300	7.885	8.048	7.897
3	1.483	1.341	3.933	4.351	3.979	4.574
4	0.937	3.218	2.764	2.820	3.147	2.268
5	0.783	1.240	0.561	0.145	0.378	0.608
6	4.663	2.508	2.572	2.399	2.357	3.151
7	0.783	1.124	1.062	1.903	0.492	0.248
8	5.511	1.629	1.810	0.286	0.929	1.810
9	8.356	7.116	7.013	3.700	3.613	3.903
10	0.111	0.435	0.081	0.333	0.181	0.378
11	0.946	1.051	1.171	1.515	1.673	1.617
12	1.066	0.545	0.452	0.811	1.532	1.511
13	1.221	0.378	0.661	0.745	0.874	0.755
14	0.934	2.626	1.052	1.345	1.288	1.181
15	2.938	0.265	0.271	0.531	0.598	0.863
16	1.798	0.963	1.014	1.555	1.893	1.988
17	8.344	10.257	9.972	10.555	9.567	8.852
18	1.137	0.858	0.411	0.173	0.286	0.324
19	6.320	3.274	3.562	1.288	1.612	2.159
20	3.888	3.001	4.379	5.173	5.219	5.202
Max=	8.356	10.257	9.972	10.555	9.567	8.852
Min=	0.111	0.265	0.081	0.145	0.181	0.248
Media=	3.014	2.655	2.628	2.451	2.441	2.493
Desv.Stand=	2.667	2.749	2.581	2.668	2.505	2.400

Fuente: el autor (2012)

Revisando los estadísticos, todos tienen como Media un valor mayor a $\pm 1.5\text{m}$, lo que indica que la imagen en ciertos sectores tiene un buen ajuste (zonas medias con 30 GCP), mientras que en otros aun con 60 GCP, no se ajusta.

4.11. RESULTADOS DEL NC PARA LAS IMÁGENES CON CG

Los resultados del nivel de confianza (NC) se obtienen aplicando la ecuación 3.3 (capítulo3); despejando $t^{\frac{\alpha}{2}}$ se obtienen un valor, el mismo que es visualizado o interpolado en la tabla de t de Student con $n - 1$ grados de libertad (igual a 19) convirtiéndose en el valor (t_0), interpretando lo que representa este valor en percentil, se resuelve la confiabilidad de las pruebas realizadas, tanto para los productos de pendiente baja, como de pendiente media.

En la tabla 4.11 se aprecian los niveles de confianza para pendiente baja y en la tabla 4.12 los niveles para pendiente media:

Tabla 4.11. Niveles de confianza para la muestra de las imágenes en pendiente baja

Nivel de confianza para productos de pendiente baja					
Productos	7GCP	9GCP	21GCP	30GCP	42GCP
$t^{\frac{\alpha}{2}}$	1.048	10.837	16.203	16.482	16.203
t_0	1.048	2.860	2.860	2.860	2.860
t. %	0.840	0.995	0.995	0.995	0.995
%	84.0	99.5	99.5	99.5	99.5

Fuente: el autor (2012)

Tabla 4.12. Niveles de confianza para la muestra de las imágenes en pendiente media

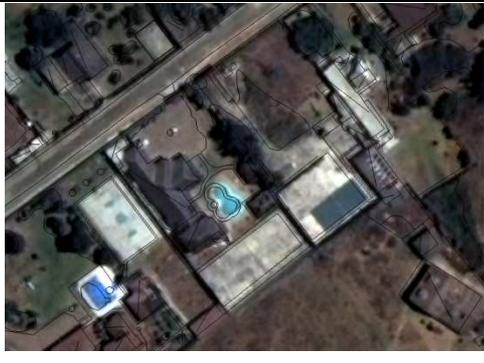
Nivel de confianza para productos de pendiente media						
Productos	7GCP	9GCP	21GCP	30GCP	42GCP	60GCP
$t^{\frac{\alpha}{2}}$	2.520	2.440	2.600	2.570	2.680	2.8
t_0	2.540	2.540	2.540	2.860	2.860	2.86
t. %	0.990	0.990	0.990	0.995	0.995	0.995
%	99.0	99.0	99.0	99.5	99.5	99.5

Fuente: el autor (2012)

4.12. RESULTADOS DE LAS ORTOIMÁGENES PARA PB

En la tabla 4.13, se aprecian unos ejemplos visuales en un sector dado del área de estudio de cada una de las ortoimágenes generadas con 7 GCP, 9 GCP, 21 GCP, 30 GCP y 42 GCP respectivamente, comparadas con la cartografía de escala 1:1.000, en color negro, para pendiente baja.

Tabla 4.13. Comparación de las ortoimágenes vs. la cartografía para pendiente baja

a)		b)	
c)		d)	
e)		f)	
<p>a) Imagen de pendiente baja original; b) ortoimagen corregida con 7GCP con altura obtenida del DEM Curvas para pendiente baja; c) ortoimagen corregida con 9GCP para pendiente baja; d) ortoimagen corregida con 21GCP para pendiente baja; e) ortoimagen corregida con 30GCP para pendiente baja y f) ortoimagen corregida con 42GCP para pendiente baja.</p>			

Fuente: el autor (2012)

Se observa que con 7 GCP (b) se comienza a ajustar la imagen respecto a la cartografía, aunque este ajuste todavía es pobre. A partir de los 9 GCP (c), hay una mejora respecto al ejemplo presentado y desde los 21 GCP (d) pues la ortoimagen aparenta ya estar en su posición verdadera.

4.13. RESULTADOS DE LAS ORTOIMÁGENES PARA PM

En la tabla 4.14, se aprecian unos ejemplos de las ortoimágenes generadas en la zona de pendiente media (PM) (incluye también áreas de pendiente alta y alta excesiva), comparadas con la cartografía del sector (información de color amarillo). En ese sentido, las ortoimágenes fueron generadas a partir de 7 GCP, 9 GCP, 21 GCP, 30 GCP, 42 GCP y 60GCP.

Tabla 4.14. Comparación de las ortoimágenes vs. la cartografía para pendiente media

a)		b)	
c)		d)	
e)		f)	
<p>a) ortoimagen corregida con 7GCP con altura obtenida del DEM Curvas para pendiente media; b) ortoimagen corregida con 9GCP para pendiente media; c) ortoimagen corregida con 21GCP para pendiente media; d) ortoimagen corregida con 30GCP para pendiente media; e) ortoimagen corregida con 42GCP para pendiente media y f) ortoimagen corregida con 60GCP para pendiente media.</p>			

Fuente: el autor (2012)

Analizando las ortoimágenes, se visualiza en la imagen de 30 GCP (d) un buen ajuste en la zona de pendiente media (recuadro rojo), aunque en el área de pendiente alta y alta excesiva (recuadro en color cian) la imagen esta desplazada respecto a la cartografía; A partir de las imágenes generadas con 42 GCP y 60 GCP hay una mejora en esas áreas de pendiente alta y alta excesiva.

4.14. RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN DE ORTOIMÁGENES

Los resultados de la comparación de la distancia de los puntos de referencia (cartografía) vs. los homólogos en las ortoimágenes en pendiente base se ilustran en la tabla 4.15.

Tabla 4.15. Resultados de la consistencia espacial de las ortoimágenes en pendiente baja

Id	DIST7GCP	DIST9GCP	DIST21GCP	DIST30GCP	DIST42GCP
1	0.733	0.814	0.567	0.640	1.233
2	0.753	0.567	0.515	1.094	1.100
3	0.292	0.162	0.543	0.540	0.462
4	1.506	1.472	1.065	1.101	1.204
5	2.987	2.691	0.918	0.975	0.814
6	1.233	1.204	1.024	0.405	0.932
7	0.567	0.609	0.308	0.413	0.417
8	2.777	1.361	1.191	0.894	1.001
9	0.128	0.292	0.172	0.081	0.256
10	2.519	1.798	1.152	0.689	0.696
11	2.683	2.299	1.557	1.213	0.978
12	3.238	2.137	1.037	0.810	0.988
13	2.017	1.850	1.449	1.583	1.789
14	1.257	0.874	0.492	1.101	0.980
15	1.564	1.101	0.905	0.405	0.181
16	1.619	1.435	1.136	0.286	0.462
17	0.975	0.978	0.980	1.224	1.086
18	2.055	1.271	0.630	0.820	0.746
19	2.194	1.195	0.932	1.383	1.051
20	3.347	2.227	1.052	0.810	0.859
Max=	3.347	2.691	1.557	1.583	1.789
Min=	0.128	0.162	0.172	0.081	0.181
Media=	1.722	1.317	0.881	0.823	0.862
Desv. Estánd.	0.963	0.671	0.356	0.384	0.369

Fuente: el autor (2012)

Interpretando los estadísticos, las ortoimágenes generadas a partir de 21 GCP, cumplirían con la precisión horizontal para escala 1:5.000 (1.5m); la ortoimagen elaborada con 7 GCP, no cumple con la precisión para esa escala, mientras que la de 9GCP se aproxima bastante bien, ya que tiene una Media de 1.317 ± 0.671 de desviación estándar. Los máximos y mínimos, denotan las diferencias alcanzadas con la muestra de 20 puntos, hay que tener

especial atención a los máximos ya que indican en donde existen mayores desplazamientos o que los puntos valorados y pinchados tienen alguna observación.

Los resultados de la evaluación de las ortoimágenes generadas con pendiente media, se encuentran expuestos en la tabla 4.16; en esta evaluación se incluye una prueba realizada con 60 GCP.

Tabla 4.16. Resultados de la consistencia espacial de las ortoimágenes en pendiente media

Id	DIST7GCPM	DIST9GCPM	DIST21GCPM	DIST30GCPM	DIST42GCPM	DIST60CGPM
1	2.440	3.735	2.262	1.962	1.840	1.121
2	7.819	10.511	3.523	5.408	5.528	4.126
3	0.614	1.110	0.877	1.347	0.703	0.328
4	1.381	1.519	0.345	0.550	0.989	0.897
5	0.381	0.921	0.583	0.222	0.539	0.837
6	0.941	0.573	2.274	1.381	1.596	2.379
7	0.869	0.756	1.111	1.278	0.457	0.194
8	1.773	0.152	2.266	1.321	1.586	2.642
9	3.858	4.193	1.219	1.133	1.074	0.921
10	0.970	1.401	0.216	0.511	0.275	0.328
11	0.534	0.976	0.658	0.076	0.054	0.555
12	1.111	1.352	0.877	0.649	0.755	0.675
13	1.423	1.886	0.162	0.651	0.595	0.550
14	2.146	2.440	1.418	1.602	1.740	1.585
15	0.603	0.460	0.897	0.877	0.667	1.365
16	0.801	0.777	0.076	0.076	0.610	0.241
17	8.958	12.046	6.080	8.108	7.062	5.337
18	0.290	0.269	0.531	0.435	0.497	0.976
19	3.087	1.720	2.244	1.079	1.258	1.567
20	3.163	4.023	2.483	3.158	2.902	2.362
Max =	8.958	12.046	6.080	8.108	7.062	5.337
Min =	0.290	0.152	0.076	0.076	0.054	0.194
Media =	2.158	2.541	1.505	1.591	1.536	1.449
Desv. Estánd =	2.302	3.143	1.397	1.907	1.731	1.313

Fuente: el autor (2012)

Revisando los estadísticos, todos tienen como Media un valor mayor a $\pm 1.5m$, observando los datos en áreas de pendiente media se alcanza un ajuste en la imagen con aproximadamente 30 GCP, con más puntos de control no se ha llegado a la precisión establecida, aunque si hay una mejora con la incorporación de la altura y una disminución del valor promedio comparando con los resultados de imágenes a partir de corrección geométrica.

4.15. RESULTADOS DEL NC EN LAS ORTOIMÁGENES

Los resultados del nivel de confianza (NC) de las muestras utilizadas en la comparación de las ortoimágenes vs. la cartografía, se obtienen aplicando la ecuación 3.3 (capítulo3); despejando $t^{\alpha/2}$ se obtienen un valor, el mismo que es visualizado o interpolado en la tabla de t de Student con n – 1 grados de libertad (igual a 19) convirtiéndose en el valor (t_0), interpretando lo que representa este valor en percentil, se resuelve la confiabilidad de las muestras utilizadas, tanto para los productos de pendiente baja, como de pendiente media.

En la tabla 4.17 se aprecian los niveles de confianza de las muestras manejadas para pendiente baja y en la tabla 4.18 para pendiente media:

Tabla 4.17. Niveles de confianza para la muestra de las ortoimágenes en pendiente baja

Nivel de confianza para productos de pendiente baja					
Productos	7GCP	9GCP	21GCP	30GCP	42GCP
$t^{\alpha/2}$	6.966	9.997	18.843	17.469	18.179
t_0	2.860	2.860	2.860	2.860	2.860
t.%	0.995	0.995	0.995	0.995	0.995
%	99.5	99.5	99.5	99.5	99.5

Fuente: el autor (2012)

Tabla 4.18. Niveles de confianza para la muestra de las ortoimágenes en pendiente media

Nivel de confianza para productos de pendiente media						
Productos	7GCP	9GCP	21GCP	30GCP	42GCP	60GCP
$t^{\alpha/2}$	2.914	2.134	4.801	3.517	3.875	5.109
t_0	2.860	2.134	2.860	2.860	2.860	2.86
t.%	0.995	0.980	0.995	0.995	0.995	0.995
%	99.5	98.0	99.5	99.5	99.5	99.5

Fuente: el autor (2012)

CAPÍTULO 5

DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Para argumentar, analizar y discutir este estudio se consideró la información utilizada en el marco teórico, metodología y resultados. Esta discusión pretende dar al usuario final una justificación y cumplimiento de los objetivos propuestos.

Tomando en consideración el cálculo del número de puntos de apoyo para la corrección geométrica y generación de ortoimágenes de alta resolución en zonas de pendiente baja y media, se propuso la toma de puntos de apoyo GPS o GCP para valorar las cartografías para escala 1:1.000 y 1:5.000. De esta manera se utilizó estos insumos como fuente para la extracción de coordenadas como puntos de apoyo en la rectificación, y de esta manera hacer pruebas con 7, 9, 14, 21 y 42 GCP en la zona de pendiente baja y hasta con 60 puntos para la zona media que incluye áreas con pendiente alta y alta excesiva.

Se tomaron más de 26 datos GPS de alta precisión en concordancia con las precisiones de las escalas mencionadas que permitieron efectuar una prueba de hipótesis con la finalidad de sustentar que tan buena es la fuente de referencia y cuál escala utilizar. En ese sentido, en las primeras tomas de GPS se tuvieron problemas en el postproceso de las coordenadas, ya que a la hora de ingresar los datos de la monografía de la Base, ésta se encontraba desplazada y el programa de corrección no permitía continuar con el proceso; entonces se planificó realizar la toma de los datos utilizando como aporte una estación de monitoreo continuo, el darle coordenadas a la Base del estadio de la ESPE, situación que permitió alcanzar presiones de $\pm 13\text{cm}$ en los datos y experimentar nuevas técnicas para resolver problemas de esta índole.

Con los resultados del GPS se hizo la valoración de la hipótesis nula: “Que la cartografía X cumple con el error horizontal estipulado para esas escalas con un nivel de confianza del 90%”. En ambas escalas se acepta la hipótesis alternativa y se rechaza la hipótesis nula, situación que pone en manifiesto que posiblemente al momento de pasar la cartografía a otro formato como el shape y pasar por distintas instituciones diferentes de la fuente

original IGM, la información se desplazó. Aun así con los puntos registrado y estadísticos calculados para la escala 1:1.000, con un nivel de confianza del 90% que oscilan en ± 0.979 metros con una desviación estándar de ± 1.207 m, se puede utilizar este insumo para rectificar las imágenes para escala 1:5.000 ya que su precisión es menor a 1.5m.

Para determinar las áreas de estudio definitivas, esta investigación se basó en los objetivos planteados, en la disponibilidad de la información recopilada y en el análisis del modelo de pendientes generado. Dentro del área preliminar se observó que la cartografía para escala 1:000 cubre en un 60% la escena de la imagen QuickBird y en cuanto al modelo existe en la zona de estudio preliminar una combinación de pendientes medias, altas y altas excesivas con un espacio considerable utilizable para los productos de pendiente baja. Con estos antecedentes y en función de las coordinaciones manejadas con el equipo tutor de la maestría, se establecieron áreas de 1 Km² tanto para pendiente baja como media; cabe aclarar que esta última no solo es pendiente media, en los extremos de la imagen hay una combinación de pendientes altas y altas excesivas y no existía un espacio único con este requisito, ejemplo real que la topografía de nuestro país influye en los resultados esperados y que no estamos exentos de que estas observaciones desaparezcan.

En cuanto a los resultados alcanzados en el proceso de corrección geométrica a partir de las pruebas realizadas con el ingreso de 7, 9, 21, 30 y 42 GCP para pendiente baja, los estadísticos iniciales del Error Cuadrático Medio (RMS) denotan un buen resultado, que se refleja en la calidad de las muestras utilizadas en el marcado de puntos de la imagen a corregir y la fuente de referencia (la cartografía). Aun así para determinar que tan bien se rectificó la imagen, se crearon 20 puntos de validación, que demuestran con un nivel de confianza del 99%, que con 21, 30 y 42 GCP se cumple la corrección con la precisión establecida para escala 1:5.000.

En cuanto a los resultados de la rectificación de la imagen para pendiente media con el método de polinomios, se observó en los productos generados, que los RMS con 7 y 9 puntos son aceptables y con más puntos, no. Validando la información con la misma metodología para la zona baja, que incluye una prueba adicional de 60 GCP, los resultados demuestran que con ese número de puntos, método, etc., la cartografía no se ajusta para

escala 1:5.000, y que posiblemente para estas zonas se puede utilizar el producto en cartografía para escala 1:10.000.

De la misma manera, se analizaron los resultados de las ortoimágenes para pendiente baja, obteniendo en la validación una buena consistencia espacial con las pruebas realizadas con 21, 30 y 42 GCP, mientras que en las de pendiente media que incluye también una prueba con 60 GCP, sus promedios son superiores a 1.5m. Por tanto sus productos no se aceptan para la escala de 1:5.000.

Cabe mencionar, que con la incorporación del modelo digital de elevaciones y siguiendo la metodología para generar las ortoimágenes, los resultados de los estadísticos como la media y la desviación estándar, son inferiores a los obtenidos por el método de deformación de polinomios. Aun así, en ambos procedimientos se aprecia en la figura 5.1., que con 21 GCP, si se ajustan las imágenes para la escala objetivo.

Figura 5.1. Comparación de los resultados de pendiente baja para los dos métodos

DESPLAZAMIENTOS DE LOS IMÁGENES CON CORRECCIÓN GEOMÉTRICA						DESPLAZAMIENTOS DE LAS ORTOIMÁGENES					
Punto PB	DIST7GCP	DIST9GCP	DIST21GCP	DIST30GCP	DIST42GCP	Id	DIST7GCP	DIST9GCP	DIST21GCP	DIST30GCP	DIST42GCP
1	5.812	0.624	0.332	0.196	0.438	1	0.733	0.814	0.567	0.640	1.233
2	8.871	0.371	0.448	0.448	1.190	2	0.753	0.567	0.515	1.094	1.100
3	0.936	0.712	1.380	0.646	1.490	3	0.292	0.162	0.543	0.540	0.462
4	16.162	1.380	0.856	1.096	1.475	4	1.506	1.472	1.065	1.101	1.204
5	2.338	2.532	1.246	0.531	0.383	5	2.987	2.691	0.918	0.975	0.814
6	17.924	0.917	1.164	0.773	0.960	6	1.233	1.204	1.024	0.405	0.932
7	2.914	0.706	0.706	0.196	1.096	7	0.567	0.609	0.308	0.413	0.417
8	17.822	1.198	1.054	0.666	0.979	8	2.777	1.361	1.191	0.894	1.001
9	0.767	0.383	0.383	0.496	1.380	9	0.128	0.292	0.172	0.081	0.256
10	1.620	1.787	1.187	0.572	1.096	10	2.519	1.798	1.152	0.689	0.696
11	3.528	2.061	1.566	1.377	1.006	11	2.683	2.299	1.557	1.213	0.978
12	5.992	2.190	1.242	1.132	0.579	12	3.238	2.137	1.037	0.810	0.988
13	1.832	1.656	1.529	1.595	0.907	13	2.017	1.850	1.449	1.583	1.789
14	5.020	0.979	0.522	0.680	0.572	14	1.257	0.874	0.492	1.101	0.980
15	2.093	1.444	1.529	1.377	0.718	15	1.564	1.101	0.905	0.405	0.181
16	23.152	0.712	0.866	0.587	0.866	16	1.619	1.435	1.136	0.286	0.462
17	8.204	1.264	1.278	1.540	1.962	17	0.975	0.978	0.980	1.224	1.086
18	8.407	1.071	0.840	0.646	0.725	18	2.055	1.271	0.630	0.820	0.746
19	9.892	1.220	0.196	0.556	0.237	19	2.194	1.195	0.932	1.383	1.051
20	3.477	2.237	1.037	0.712	0.689	20	3.347	2.227	1.052	0.810	0.859
Max=	23.152	2.532	1.566	1.595	1.962	Max=	3.347	2.691	1.557	1.583	1.789
Min=	0.767	0.371	0.196	0.196	0.237	Min=	0.128	0.162	0.172	0.081	0.181
Media=	7.338	1.272	0.968	0.791	0.937	Media=	1.722	1.317	0.881	0.823	0.862
Desv.Stand=	6.399	0.619	0.414	0.407	0.414	Desv. Estánd.	0.963	0.671	0.356	0.384	0.369

Fuente: el autor (2012)

Comparando los resultados con las recomendaciones sugeridas en el marco teórico por Villa y Arozerena en el año 2008, se puede decir que se comprueba la hipótesis de que con 18 a 24 puntos de apoyo y con un polinomio de orden 2, se puede realizar la corrección

geométrica y ortoimagen de un insumo QuickBird, en pendiente baja y con una extensión de 1 Km²; y si comparamos con la referencia expuesta por Murillo (n.d.) en su exposición de “Preprocesamiento: Correcciones Radiométricas y Geométricas de las Imágenes”, que para el ajuste se necesitan como mínimo 12 GCP, en base a las pruebas realizadas se necesitan más puntos de apoyo en pendiente media y más de 60 GCP en pendiente media con el empleo de un modelo digital de elevaciones de alta precisión.

Realizando un análisis FODA simple y resumido; como fortalezas se observa que con 21 GCP y aplicando el método de ajuste de polinomios de orden 2, se puede georeferenciar una imagen QuickBird de pendiente media y con el área mencionada; como oportunidades, se demuestra que incluyendo un MDE se pueden mejorar los resultados alcanzados; como debilidades, es necesario indagar más con el procedimiento de realización de ortoimágenes ya que hay parámetros existentes que necesitan una mayor sustento; y como amenazas, con las metodologías aplicadas no se pudo alcanzar buenos resultados para pendientes medias.

Finalmente, si se hace una deducción de los recursos económicos, sin considerar la compra de imágenes de satélite, con 21 GCP tendríamos que presupuestar 2100 dólares para la toma de puntos GPS en áreas cercanas al Distrito Metropolitano de Quito, considerando el costo por punto en 100 dólares; y si es fuera de la ciudad el proyecto, tendríamos que adicionalmente presupuestar el desplazamiento, los viáticos, la seguridad, el área de estudio, pasajes, combustible, alquiler de vehículo y otros gastos.

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. CONCLUSIONES

Con el afán de calcular el número de puntos de apoyo (GCP) útiles para la georeferenciación, se ha plasmado una metodología para la corrección de imágenes utilizando los modelos de deformación polinomiales y para la generación de ortoimágenes aplicando el método monoscópico mediante una imagen 2D y un modelo digital de elevaciones 1D (MDE).

Mediante los conocimientos adquiridos a lo largo del estudio de la Maestría, se pudieron entender, modelar y aplicar herramientas, para revisar, estandarizar, procesar y comparar los resultados obtenidos del tema de tesis.

Con un nivel de confianza del 90%, con 21 GCP, aplicando los dos métodos descritos, se puede rectificar y ortorectificar una imagen QuickBird para zonas de baja pendiente y de extensión aproximada a 1 Km². y generalizando este resultado, se puede aplicar esta metodología para imágenes de igual o mejor resolución espacial.

En base a la información recopilada en el marco teórico, se han comprobado las sugerencias teóricas de Villa y Arozerena (2008), de que el número de puntos de apoyo para realizar la corrección geométrica de imágenes con un polinomio de orden 2, es aproximadamente de 18 a 24 GCP, esta comprobación sirve siempre y cuando este proceso se aplique para un área igual a la del proyecto y con las condiciones de pendiente enunciadas.

A pesar de haber realizado las pruebas y metodologías descritas en la zona de pendiente media que incluye en su área pendientes altas y altas excesivas, no se pudieron realizar ajustes óptimos en la precisión horizontal para escala 1:5.000. Sin embargo, este conocimiento es de gran aporte para la comunidad que utiliza las Tecnologías de

Información Geográfica, ya que visualmente se observó que en un rango de 30 a 42 GCP, en los espacios de pendiente media si se puede corregir la imagen con el proceso de ortoimagen. Además, sirve como proyecto de investigación para contestar a la pregunta: ¿con cuántos puntos de apoyo se corrigen las imágenes que contienen es sus áreas distintas pendientes que incluyen altas y altas excesivas?

Sin duda, la información incluida en esta tesis, es importante para cualquier usuario que necesita aplicar un proceso de corrección geométrica en imágenes, ya que tanto la información conceptual como las etapas para la corrección, tienen una terminología universal aplicada por varios autores.

También hay que destacar que la geomorfología existente en el Ecuador es un factor determinante a la hora de realizar rectificaciones en imágenes satelitales, situación que nos permite analizar que no basta con aplicar algunos de los conceptos ilustrados en el marco teórico, sino que es un tema de investigación más avanzado, y se necesita una profundización en el estudio de diferentes áreas y sensores, en las técnicas modernas existentes como el conocimiento de modelos rigurosos físicos, aplicación de polígonos racionales (por sus siglas en inglés – RPC), modelos propios del software como el existente en ERDAS 11 para imágenes QuickBird, SPOT 5 y otros.

6.2. RECOMENDACIONES

Se recomienda utilizar esta información como fuente de apoyo conceptual, como metodología para la corrección geométrica en zonas de pendiente bajas en donde el relieve sea constante y plano, como herramienta de planificación para la toma de puntos de apoyo en campo, pero como metodología en zonas de relieve medio y variado (en este caso de estudio) no es aplicable con el número de puntos de apoyo indicado, se necesita un número mayor y se sugiere profundizar en las técnicas modernas existentes como el conocimiento de modelos rigurosos físicos, aplicación de polígonos racionales (Racional Polinomial Coefficients – RPC), modelos propios del software como el existente en ERDAS 11 para distintos tipo de imágenes.

Para mejorar los resultados, además de lo antes indicados, se recomienda perfeccionar la planificación; ser más específicos en el punto que se debe tomar; capacitar al profesional que va a realizar este proceso en todo los aspectos, a más del manejo del equipo, especialmente en identificar el objetivo mejor, indicarle los sitios que no sirven y qué se debe hacer en caso de no encontrar un sitio (para qué tomar un punto GPS, si este no va a valer en la ortorectificación); aumentar el número de puntos de apoyo GPS (importantísimo) y pinchar en la imagen los puntos obtenidos in situ, no luego de ser postprocesados.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

Arozerena, A. (2008). *Curso de teledetección aplicada al Ordenamiento Territorial: Tratamiento Digital de Imágenes / Producción*. Madrid: Instituto Geográfico Nacional.

Caimel, J. (2002). *Ortorectificación de Fotografías Aéreas utilizando el Software ERDAS IMAGINE*. Obtenido el 05 de enero de 2011. [En línea]. Disponible en: www.cartografia.cl/download/manuales/erdas.pdf

Chuvienco, E. (2008). *Teledetección Ambiental: La observación de la Tierra desde el espacio (3ra. ed.)*. Barcelona: Ariel.

CLIRSEN. (2008). *Proyecto "EMAP-Q y EMOP-Q: Corrección Geométrica de Imágenes QuickBird del Distrito Metropolitano de Quito*, Quito: Centro de Levantamientos Integrados de los Recursos Naturales por Sensores Remotos.

CNICE. (n.d.). *Glosario de Teledetección*. Obtenido el 03 de enero de 2011. [En línea]. Disponible en: <http://concurso.cnice.mec.es/cnice2006/material121/unidad3/glosario.htm>

Del Bosque, I., (2004). *Curso de Procesamiento Digital de Imágenes de Satélite: Aplicaciones a la Cartografía Temática*. Guatemala: Instituto Geográfico Nacional y la Agencia Española de Cooperación Internacional.

Disfruta de las Matemáticas. (2011). *Distribución normal estándar*. Obtenido el 04 de abril de 2012. [En línea]. Disponible en: <http://www.disfrutalasmatematicas.com/datos/distribucion-normal-estandar.html>

Emory, E. & Phlegar. & Torres, O. (1983). *Manual Técnicas de Separación de Colores*. Panamá: Escuela de Cartografía.

ERDAS Tour Guide, (2001). *Ortorectificación*. Traducción de la Universidad Distrital de Bogotá. Bogotá: ERDAS Inc.

ESA. (2012). *QuickiBird*. European Space Agence. Obtenido el 12 de marzo de 2012. [En línea]. Disponible en: http://www.esa.int/esaMI/Eduspace_ES/SEMV76E3GXF_0.html

ESRI. (2010). *Learning ArcGIS Spatial Analyst*. Obtenido el 18 de julio de 2010. [En línea]. Disponible en: <http://training.esri.com/gateway/index.cfm?fa=myTraining.myVCTraining>

Fuentes, F. (2009). *Citas y Referencias Bibliográficas*. Empírica: Seminario de Investigación – Maestría en Economía Aplicada. Obtenido el 21 de junio de 2011. [En línea]. Disponible en: www.empirica.com.do/.../Clase5-CitasyReferenciasBibliograficas.pdf

Kirby, E. (2007). *Metodología para el Cálculo de las Anomalías de Bouguer Completa*. Tesis de Grado. Sangolquí: ESPE.

Kirby, E. (2011). *Metodología para la generación de Ortoimágenes*. Monografía. Quito: USFQ.

MAGRAMA. (n.d.). *Pendiente*. Ministerio de Agricultura de España. Madrid.

Murillo, R. (n.d.). *Preprocesamiento: Correcciones Radiométricas y Geométricas de las Imágenes*. UAEM. Obtenido el 15 de abril de 2012. [En línea]. Disponible en: http://www.everyoneweb.es/WA/DataFilesemurillofacgeo/E_CORRECCIONES.pdf

Murray, R. (1991). *Estadística de Shaum (2da ed.)*. España: McGRAW – HILL.

Peces, J. (2006). *Curso de Teledetección Aplicada al Ordenamiento Territorial: Aplicaciones Topográficas y Temáticas*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.

Pernía, J. (1999). *Sensores Espaciales para Estudios Ambientales, a las Puertas del Siglo XXI*. Venezuela: Universidad de los Andes. Obtenido el 13 de abril de 2012 [En línea]. Disponible en: www.saber.ula.ve/bitstream/123456789/24197/1/articulo43_2_8.pdf

Sánchez, N. & Pérez, C. (n.d.). *Control Geométrico de Imágenes QuickBird para fines Cartográficos*. Obtenido el 13 de marzo de 2012. [En línea]. Disponible en: www.isprs.org/proceedings/2005/semana_geomatica05/.../R26.pdf

Villa G. (2008). *Curso de Teledetección aplicada al Ordenamiento Territorial: Sensores y Técnicas Avanzadas*. Madrid: Instituto Geográfico Nacional & Universidad de Salamanca.

Villa, G. (2008). *Curso de Teledetección Aplicada al Ordenamiento Territorial: Tratamientos*. Madrid: Universidad de Salamanca & Universidad Politécnica de Madrid.