



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO DE EDAFOLOGÍA

ELABORACIÓN DE UN MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN MEDIANTE EL USO DE IMÁGENES ESTEREOSCÓPICAS DE SATÉLITE DE ALTA RESOLUCIÓN ESPACIAL EROS-B

MARTÍNEZ ROMAN HUMBERTO

T E S I S
PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MEXICO

2015

La presente tesis titulada: **Elaboración de un Modelo Digital de Elevación mediante el uso de Imágenes Estereoscópicas de Satélite de alta resolución espacial EROS-B**, realizada por el alumno: **Humberto Martínez Román**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS
EDAFOLOGÍA

CONSEJO PARTICULAR

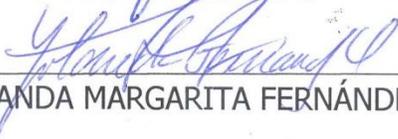
CONSEJERO


DR. VICENTE ESPINOSA HERNÁNDEZ

ASESOR


DR. LENOM CAJUSTE BONTEMPS

ASESOR


DRA. YOLANDA MARGARITA FERNÁNDEZ ORDOÑEZ

ASESOR

Montecillo, Texcoco, Estado de México, Diciembre 2015

ELABORACIÓN DE UN MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN MEDIANTE EL USO DE IMÁGENES ESTEREOSCÓPICAS DE SATÉLITE DE ALTA RESOLUCIÓN ESPACIAL EROS-B

HUMBERTO MARTÍNEZ ROMÁN, M. en C.
Colegio de Postgraduados 2015

RESUMEN

El objetivo de este trabajo es describir la metodología sobre la posibilidad de extraer Modelos Digitales de Elevación, MDE (*Digital Elevation Model* por sus siglas en ingles) de imágenes estereoscópicas adquiridas de una de las plataformas satelitales, con menos referencias en la bibliografía: EROS-B. En el presente trabajo, se propone que las fases de extracción de un MDE, sea a partir del uso de pares estereoscópicos de alta resolución utilizando diferentes metodologías que se ilustran, y los resultados obtenidos se describen y analizan. Se llevaron a cabo aplicaciones sobre el uso de GCP (*Ground Control Points*, Puntos de control terrestres) y de DGPS (*Differential Global Position System*, Sistema de Posicionamiento Global). La investigación se centró en un par de imágenes estéreo adquiridos por este satélite en zonas morfológicamente diferentes, una en los alrededores del área conurbada del municipio de Texcoco y la otra en lo que es la Sierra Nevada. La importancia de este estudio se debe, en parte, para poner a prueba la posibilidad del uso de las imágenes del satélite de origen israelí EROS-B, permitiendo así la extracción de modelos digitales de elevación, posteriormente, con el objeto de evaluar la calidad se comparan el MDE del sensor, con el obtenido por el INEGI a 15 metros.

En este trabajo, se llevaron a cabo distintas etapas, en el proceso de extracción de un Modelo Digital de Elevación (MDE) de pares estereoscópicos EROS-B, para posteriormente hacer una evaluación de la precisión del MDE extraído. En esta investigación se utilizó el software comercial: PCI Geomática versión 2013 y versión 2014. La importancia del estudio en este documento es la presentación de la metodología que se sigue, para mostrar la factibilidad de extraer un modelo digital de elevación a partir de imágenes satelitales adquiridas de la plataforma poco investigado para este campo de aplicación específica, EROS-B.

Palabras clave. DEM, DSM, EROS-B, stereo pairs, satellite imagery.

DEVELOPMENT OF A DIGITAL ELEVATION MODEL USING STEREOPAIRS SATELLITE IMAGES WITH VERY HIGH SPATIAL RESOLUTION EROS-B

HUMBERTO MARTÍNEZ ROMÁN, M. en C.
Colegio de Postgraduados 2015

ABSTRACT

The aim of this paper is to describe the methodology of the possibility to extract Digital Elevation Models (DEM) of stereoscopic imagery acquired from one of the least studied satellite platforms: EROS-B. In this paper the stages of extracting a DEM of high resolution stereo pairs using different methodologies are illustrated, and the results are described and analyzed. Were carried out experiments on the use of GCP and DGPS. Experimentation focused on two stereo pairs acquired by the satellite in morphologically different areas including one near to the town of Texcoco and the other on the Sierra Nevada. The importance of this study is due, in part, to test the usability of EROS-B thus allowing the extraction of digital elevation models to compare the DEM generated by INEGI against the sensor.

In this work the steps of extracting a Digital Elevation Model (DEM) from stereo pairs EROS-B are illustrated, after describing the assessment of the accuracy of the extracted DEM. Commercial software was used in this research: PCI Geomatics version 2013 and version 2014. The importance of the study presented in this paper is due in part to the fact of illustrates a series of steps performed to demonstrate the real possibility to extract digital elevation model from satellite images acquired from the platform under-researched field for this specific application, EROS-B.

Keywords. DEM , DSM, EROS-B, stereopairs, satellite imagery.

DEDICATORIA

A MIS PADRES

*Por su invaluable apoyo y esfuerzo de estar conmigo a cada paso que he dado para lograr mis metas y por guiarme siempre en el camino del bien.
Por siempre...Gracias.*

Que nadie este seduciéndose a sí mismo: Si alguno entre ustedes piensa que es sabio en este sistema de cosas, hágase necio, para que se haga sabio. Porque la sabiduría de este mundo es necedad para con Dios.

1 Corintios 3: 18,19

Porque está escrito: "Haré perecer la sabiduría de los sabios, y echaré a un lado la inteligencia de los intelectuales". ¿Dónde está el sabio? ¿Dónde está el escriba? ¿Dónde el disputador de este sistema de cosas? ¿No es cierto que Dios ha transformado en locura la sabiduría de este mundo?.

1 Corintios 1:19,20

AGRADECIMIENTOS

A mis hermanos Rubén, Esaú, Rosa Martha, Uziél y Moisés por ser los mejores hermanos del Mundo y ser un gran ejemplo a seguir de preparación, dedicación, trabajo y esfuerzo.

Un agradecimiento especial a Tere por ese gran apoyo de siempre y animarme para culminar este y muchos otros proyectos más con éxito. Gracias por tu apoyo Amore.

A mis hijos Marcia Fernanda y Franco, esperando nuevamente sirva para ustedes como un estímulo de superación y preparación para culminar las metas que se pretenden en la vida profesional.

A todos mis compañeros y amigos de Edafología: Esteinger, Tania, Charly, Esmeralda, Estefany, Jhony, Carmelita, Don Mario, Pedro, M en C. Patricio por haberme hecho una estancia placentera, alegre y amena dentro del Colegio de Postgraduados.

Un agradecimiento muy especial a mi gran amigo M. en C. Enrique Suastegui por todo su gran invaluable apoyo y conocimiento, te agradezco mucho amigo por todo tu apoyo y enseñanza para que pudiera culminar este proyecto.

Al Dr. Enrique Ojeda Trejo y Dr, Lenom Cajuste Bontemps por todo su apoyo, conocimiento y experiencia en esta área de la ciencia. Al Dr. Demetrio Fernández por brindarme las facilidades y equipo para los levantamientos de campo.

A los compañeros de BITS Héctor Betancourt Valdez, Leopoldo Zamudio y a Roberto Arzate por su gran apoyo en los levantamientos de campo.

Al M. en C. Víctor Manuel García Vázquez y al IQ. Miguel Rojas Mendoza por su estímulo y conocimiento

A todos y muchos otros más...Gracias

CONTENIDO

RESUMEN	ii
ABSTRACT	iv
1.INTRODUCCIÓN	1
2.JUSTIFICACIÓN	8
3.OBJETIVOS	10
<i>Objetivo General</i>	10
<i>Objetivos Particulares:</i>	10
4.REVISIÓN DE LITERATURA	11
4.1. <i>Definiciones y conceptos</i>	11
4.1.2 <i>Métodos y técnicas actuales para la elaboración de un Modelo Digital de Elevación</i>	16
4.1.3. <i>Métodos directos</i>	16
<i>GPS: Sistema de Posicionamiento Global</i>	17
<i>Levantamiento topográfico</i>	18
4.1.3. <i>Métodos indirectos</i>	19
a) <i>Digitalización de mapas topográficos</i>	19
b) <i>Restitución a partir de pares de imágenes</i>	20
c) <i>Digitalización de mapas topográficos</i>	20
d) <i>Imágenes estereoscópicas digitales</i>	23
4.1.4 <i>Aspectos básicos de la Estereoscopía en MDE</i>	24
4.1.5 <i>Imágenes Estereoscópicas Analógicas</i>	28
4.1.6 <i>Generación de MED de Visión estereoscópica</i>	30
4.2 <i>Generación de Algoritmos en los MDE</i>	34
5. MATERIALES Y MÉTODOS	38
5.1. <i>Ubicación espacial y aspectos generales de la zona de estudio</i>	38
5.2 <i>Adquisición de datos</i>	45
5.3 <i>Software</i>	48
5.4 <i>Levantamiento terrestre mediante GPS de alta precisión</i>	49
6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	53
6.1 <i>Extracción del MDE</i>	55
7. CONCLUSIONES	67
8. RECOMENDACIONES	68
9. LITERATURA CITADA	69

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Especificaciones de satélites ópticos de muy alta resolución contemporáneos capaces de producir imágenes estéreo.....	25
Cuadro 2. Localidades urbanas y rurales. Fuente INEGI 2013.....	42
Cuadro 3. Características de las imágenes estereoscópicas EROS-B para la obtención del MDE.....	47
Cuadro 4. Especificaciones GPS ProMark 3.....	50
Cuadro 5. Puntos levantados y descargados del equipo GPS.....	53
Cuadro 6. Coordenadas Geodésicas de las Estaciones de la RGNA empleadas para la corrección diferencial de los puntos levantados mediante GPS (ITRF2008, ÉPOCA 2010.0).....	54
Cuadro 7. Puntos GPS levantados con corrección diferencial, donde obtenemos los datos de Longitud (X), Latitud (Y) y Altura (Z).....	55
Cuadro 8. Cuadro comparativo de valores X, Y y Z de los MDE EROS-B e INEGI y los datos obtenidos mediante levantamiento DGPS.....	60
Cuadro 9. Alturas normalizadas para el modelo experimental.....	63

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Modelo digital de elevación LIDAR de tipo terreno en perspectiva – Nuevo León.....	16
Figura 2. Modelo digital de elevación LIDAR de tipo superficie en perspectiva – Tajín.....	17
Figura 3. Tipos de GPS.....	18
Figura 4. Levantamiento topográfico.....	19
Figura 5. Tipos de escáneres.....	21
Figura 6. Tabletas digitalizadoras.....	22
Figura 7. Software para digitalizar.....	22
Figura 8. Imagen estereoscópica pancromática de satélite Pléyades 50 cm.....	23
Figura 9. Imagen estereoscópica de satélite GeoEye 50 cm.....	26
Figura 10. Tripleta estereoscópica de satélite TH-1 a 5 metros, Pancromático (0.51 - 0.69 μm).....	26
Figura 11. MDE extraído de tripleta estereoscópica del satélite con resolución espacial de 10 metros. Centro-Norte Ciudad de México, Fuente: Cloud Mapping Technologies.....	27
Figura 12. Imagen estereoscópica del satélite Kompsat-3 a 70 cm, Pancromático (0.51 - 0.69 μm). Norte Ciudad de Monterrey; Fuente: Cloud Mapping Technologies.....	27
Figura 13. MDE extraído de imagen estereoscópica del satélite Kompsat-3 con resolución espacial de 1.5 metros. Norte Ciudad de Monterrey; Fuente: Cloud Mapping Technologies.....	28
Figura 14. Estereoscopio de bolsillo.....	29
Figura 15. Fotografías aéreas analógicas consecutivas.....	30
Figura 16. Captura de imagen estereoscópica por sensores espaciales.....	31
Figura 17. Generación de MDE de imágenes de satélite estereoscópicas. Las flechas se refieren a la dirección del satélite de vuelo. Las líneas de bajo con flechas son la proyección ortográfica de la órbita en el suelo. Órbitas 1 y 2 son dos órbitas designadas que cumplan los requisitos de pares estéreo. Izquierda: A lo largo del track (ruta en inglés). Derecha: Al otro lado del track (ruta en inglés).....	32
Figura 18. Procedimiento de generación automática del MDE.....	36
Figura 19. Localización geográfica del área de estudio.....	38
Figura 20. Localización del área de estudio.....	39
Figura 21. Subcuencas de la cuenca oriental del Valle de México.....	40
Figura 22. Localidades urbanas y rurales. Fuente: INEGI 2013.....	42
Figura 23. Elevaciones. Fuente: INEGI 2013.....	43

Figura 24. Grupos climáticos.	44
Figura 25. Tipos de Suelos.	45
Figura 26. Satélite EROS-B1	46
Figura 27. Modelo Marco conceptual de la metodología utilizada para la extracción del MDE	48
Figura 28. GPS ProMark 3.	51
Figura 29. Levantamiento de puntos GPS programados.	52
Figura 30. Localización de las estaciones de la RGNA empleadas para el proceso de Corrección Diferencial del levantamiento GPS.	54
Figura 31. Captura sobre las imágenes estereoscópicas EROS-B de los 13 GCP DGPS.....	56
Figura 32. RMS final para la generación de las imágenes epipolares.	57
Figura 33. Parámetros finales para la extracción del MDE.	58
Figura 34. MDE con resolución espacial de 1.5 metros usando imágenes EROS-B.	59
Figura 35. Código de lenguaje R empleado, y la representación raster en R de los MDE del INEGI y EROS-B..	61
Figura 36. Código de lenguaje R empleado.	61
Figura 37. Regresión de la matriz de los raster, donde Altura_I corresponde a Alturas INEGI y Alturas_E a Alturas EROS-B.	62
Figura 38. MDE EROS-B vs MDE NEGI 15 m., con dos regiones de confianza	62
Figura 39. MDE EROS-B e Histograma de datos altitudinales.	64
Figura 40. Grafica de tendencia de puntos DGPS del MDE EROS-B..	64
Figura 41. MDE INEGI e Histograma de datos altitudinales.	65
Figura 42. Grafica de tendencia de puntos DGPS del MDE INEGI.	65
Figura 43. Comparativo de los rasgos geomorfológicos entre el MDE EROS-B e INEGI.	66

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, existen diferentes métodos y técnicas para la elaboración de un Modelo Digital de Elevación, estos los podemos clasificar en métodos directos e indirectos, estos últimos están basados en el uso de datos existentes, los cuales son escaneados y digitalizados en software especializados de tipo SIG (Sistemas de Información Geográfica) o tabletas digitalizadoras, así como los métodos de interpolaciones los cuales conllevan un error atribuido al digitalizador y al nivel de georreferencia de los datos; los métodos directos se obtienen a partir de mediciones que se realizan directamente sobre el terreno real, este tipo de método ha generado mayores alternativas metodológicas y tecnológicas para la generación de un MDE.

En México los insumos topográficos públicos, que podemos encontrar son los desarrollados por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) escala 1:50 000 y partes del país a 1:20, 000, realizados a partir de conversión de mapas y de método fotogramétrico de correlación de imágenes, de la misma manera, en México se puede obtener el MDE de la misión *NASA/Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) con resoluciones espaciales de 90, 60 y 30 metros; este tipo de datos es acotado a una serie de aplicaciones en escala y precisión, por lo que en múltiples aplicaciones en materia de ciencias de la tierra y de protección civil es necesario contar con datos topográficos de mayor exactitud, los sensores remotos montados sobre plataformas aerotransportables como es el caso del RADAR y el LIDAR (*Light Detection and Ranging*) permite generar este tipo de datos, este tipo de tecnología sigue siendo costosa en términos económicos y técnicos, tanto en su levantamiento como en su procesamiento; pero de igual manera es importante señalar que a este tipo de

tecnologías se han integrado en los últimos años los satélites artificiales de observación terrestres de alta resolución espacial cuya tecnología permite la generación de datos topográficos mismos que se están empleando en distintas partes del mundo con muy buenos resultados, lo que permitirá la generación de cartografía y de distintos procesos medio ambientales a escalas muy grandes.

En ciencias de la tierra, la morfología del terreno juega un papel importante. Por lo tanto, una adecuada comprensión de las características del terreno es esencial para cualquier búsqueda científica. Históricamente, varias técnicas se han utilizado para este propósito. Algunas de estas técnicas incluyen métodos basados en campos como la triangulación, interpolación, extrapolación etc., a pesar de la alta precisión que es alcanzable, un inconveniente principal de estos métodos es la toma de tiempo y, a menudo, complejos en su ejecución (Mukherjee *et al.*, 2012).

En las últimas décadas, sin embargo, la llegada de las tecnologías geoespaciales ha proporcionado una manera más sencilla de caracterizar los atributos del terreno mediante el uso de imágenes de satélite. A pesar que la técnica LIDAR es muy precisa, pero no es accesible en México, principalmente por su alto costo, por lo que los usuarios buscan continuamente opciones. Existen diferentes MDE públicos, disponibles en internet, pero al igual que los de SRTM, su rango de resolución son de moderada a gruesa. Entre los más conocidos se pueden mencionar las imágenes ASTER (*Advanced Space-borne Thermal Emission and Reflection Radiometer*) Modelos de Elevaciones Globales Digitales de Versión 2 (GDEM V2) fue lanzado el 17 de octubre de 2011 por el Ministerio de Economía, Comercio e Industria (METI)

de Japón y la Administración Nacional de la Aeronáutica y el Espacio (NASA). Estos datos del modelo de elevación cubren casi todo el mundo. Tiene una resolución espacial de 30 metros, que es muy eficaz para estudios de análisis de terreno, al igual que los SRTM (Rabas *et al.*, 2003, NASA, 2015).

Otras opciones de información, son las Imágenes estereoscópicas, así como imágenes de radar de apertura sintética (SAR), las cuales se utilizan para extraer la información del terreno. Asimismo, las imágenes estéreo de alta resolución de satélites, son una herramienta valiosa para la actualización topográfica de mapas (El-hadi, 2011). Hay estéreo imágenes de los satélites como IKONOS y CARTOSAT, que tienen una alta resolución espacial y la precisión de los productos derivados es también muy buena. Los Modelos Digitales de Elevación derivados de estas imágenes y los atributos extraídos de ellos son parámetros importantes para la recopilación de información sobre un fenómeno y predecir su comportamiento futuro mediante modelación geoespacial.

Las imágenes obtenidas por los satélites de teledetección ofrecen una perspectiva única de la tierra, sus recursos y el impacto que sobre ella ejercen los seres humanos. Aunque su disponibilidad para Teledetección apenas tenga un poco más de una década en nuestro país. No obstante, esta ciencia ha demostrado ser una fuente rentable de valiosa información para numerosas aplicaciones, entre las que cabe citar la planificación urbana, vigilancia del medio ambiente, monitoreo de cultivos, prospección petrolífera, desarrollo de mercados, localización de bienes raíces y muchas otras.

Por lo anterior, existe un importante mercado comercial por productos derivados de satélites, como los MDE, los cuales son ampliamente utilizados para la cartografía

y aplicaciones de ingeniería. Los usos incluyen muchos campos en obras de ingeniería civil, agricultura, navegación, geografía y otros. Otra tendencia creciente recientemente es el uso de este producto como una capa adicional en proyectos GIS (Novak y Stephen ,1992; Shears y Allan ,1996). Los datos de MDE generalmente vienen en forma de X, Y, Z de coordenadas sobre la superficie del suelo. En muchos casos, se utilizan mallas regulares de puntos donde los valores de elevación se almacenan en los nodos. Otros tipos de almacenamiento de datos también son comunes.

Recientemente, un gran número de satélites proporcionan imágenes con altos potenciales aplicaciones en diversos campos de la geomática, en particular la capacidad de producir datos para la generación de MDE (Gruen *et al.*, 2004, Baltsavias *et al.*, 2006). Además de estas ventajas evidentes, las imágenes de satélite muestran, literalmente, mucho más de lo que el ojo humano puede observar, al develar detalles ocultos que de otra forma estarían fuera de nuestro alcance. Algunas imágenes, por ejemplo, muestran las enfermedades y estrés de la vegetación y de los cultivos agrícolas, la existencia de minerales en afloramientos rocosos o la contaminación de los cuerpos de agua, ríos y mares de nuestro planeta. Incluso algunos sensores en satélites, tienen la capacidad de capturar información aun cuando se presenten nubes y niebla lo cual oculta parte de la superficie terrestre.

El valor práctico y la multiplicidad de aplicaciones de las imágenes continúan aumentando a medida que se lanzan nuevos satélites, que se suman a los que ya están en órbita. Al haber más satélites se dispone de imágenes en una cantidad creciente de tamaños de escena, resoluciones espectrales, frecuencias de paso y

detalles espaciales que permiten la generación de cartografía y representaciones del relieve con mayor precisión.

Durante siglos, la cartografía y la representación del relieve han jugado un papel importantísimo para mostrar con mayor detalle y exactitud los elementos presentes en la superficie terrestre, siendo de gran importancia para el análisis y estudios de muy diversa índole en los distintos campos de ciencias de la tierra, lo que permite una mejor planeación en el aprovechamiento de nuestros recursos y una mejor toma de decisiones traduciéndose en una mejor relación de las actividades humanas sobre nuestros recursos.

La creación de un Modelo Digital de Elevación (MDE) se inició durante la década de los años 50's del siglo XX, permitiendo representaciones del terreno a escalas y resoluciones espaciales distintas a través del uso de software y equipos altamente especializados de aquellos años.

Hacer el cálculo de un MDE, no es un proceso rutinario y tampoco analítico, debido a que las fuentes de información son de tipo continuo y expuestas a las limitaciones de los aparatos de medición, por lo mismo, el proceso de desarrollo es necesariamente de tipo numérico, lo que implica necesariamente fuentes de error, estas han sido descritas por Burrough (1986), Wise (1998) y Heuvelink (1998). La evolución de las distintas metodologías en Teledetección, han determinado que la exactitud del MDE, puede cuantificarse nominalmente mediante el RMSE estadísticamente. Por ejemplo, la resolución del MDE ha demostrado un impacto directo en la modelación hidrológica e hidrodinámica para una predicción de eventos de inundación repentina (Wolock y Price, 1994, Zhang y Montgomery, 1994, Band y Moore, 1995, Quinn et al., 1995).

La literatura, ha señalado que el tamaño de celda de la cuadrícula de un MDE raster afecta significativamente los atributos del terreno derivados (Kienzle, 2004). El impacto de la resolución de la celda en los parámetros del terreno se ha relacionado tanto con la complejidad topográfica y la naturaleza de los algoritmos utilizados para calcular atributos del terreno.

Actualmente los avances en informática y desarrollo tecnológico, así como el avance en materia espacial con el lanzamiento de satélites artificiales de observación terrestre, tecnología de Sistema de Posicionamiento Global (GPS), software especializado de Sistemas de Información Geográfica, han permitido lograr la representación del relieve muy versátil y funcional ya que a partir del mismo se puede conocer la conformación o morfología del terreno (MDT), sino también los elementos de origen antrópico y la vegetación presente en el mismo (MDS); de esta forma, la metodología tiene como finalidad mostrar el proceso metodológico para la elaboración de un Modelo Digital de Elevación mediante el uso de imágenes estereoscópicas de satélite de alta resolución espacial EROS-B, así mismo medir la precisión vertical y horizontal (valores de precisión en X , Y y Z) con tecnología satelital GPS de alta precisión, y permitir con ello establecer la resolución espacial aprovechable para la representación de datos cartográficos en materia de edafología y ciencias de la tierra de interés, donde un MDE juega un papel importante para las simulaciones numéricas de procesos.

Levantamientos de campo y fotogrametría aérea eran las principales fuentes de datos MDE. La facilidad y velocidad de uso de la fotogrametría es incomparable y se establecen para ser la principal técnica para la obtención de datos en 3D. Métodos

analíticos de fotogramas métricos ofrecen una precisión relativamente razonable, velocidad y costo versus los métodos de campo de topografía. Estos métodos suelen depender de la capacidad humana para interpretar la cubierta superficial y decidir puntos conjugados estereoscópicos.

El creciente uso de la fotografía aérea y otras técnicas de mapeo y monitoreo de recursos terrestres, junto con el rápido desarrollo de hardware y software han instado a los científicos para automatizar el proceso de extracción de MDE mediante el uso de pares estereoscópicos de aéreas digitales y / o digitalizados. Estos métodos tratan de imitar la capacidad de inteligencia humana en visión estereoscópica (Heipke, 1999). En la actualidad existe una gran necesidad de estos datos para generar de manera más rentable, con menos tiempo y sin pérdida de precisión.

2. JUSTIFICACIÓN

El desarrollo de la Teledetección Espacial (también conocida como Percepción Remota), ha sido vertiginoso en la última década y en el corto plazo parece garantizar un crecimiento aún más acelerado si tomamos en consideración el desarrollo y lanzamiento de constelaciones de satélites nuevos, además del lanzamiento de satélites especializados, el notable avance en los sistemas de comunicación, almacenamiento y análisis digital de la información y el creciente empleo de distintos sensores de observación terrestre que permiten no sólo originar una enorme cantidad de información, sino también una nueva forma de conocer, estudiar y analizar la superficie terrestre, entonces resulta claro que la Percepción Remota, junto a las técnicas y métodos tradicionales de almacenamiento y proceso de la información geográfica, permiten disponer de una gran cantidad de información sobre nuestro entorno.

Actualmente, con el uso de las imágenes de satélite, es posible obtener la representación topográfica de la superficie terrestre a través de un Modelo Digital de Elevación con alta resolución espacial (hasta 1 metro), la Percepción Remota es una técnica aplicada y como tal muy dependiente del estado de desarrollo tecnológico existente en cada momento y espacio por lo que para aprovechar con éxito estas técnicas es necesario el acceso a computadoras de alta velocidad y gran almacenamiento, que colaboran en la interpretación rápida y económica del fenómeno bajo estudio, a la vez que permite acceder y realizar análisis integrales, difícilmente viables con otros métodos tradicionales, el uso de los datos topográficos o altitudinales a través de un MDE desempeñan un papel importantísimo en estudios

de ciencias de la tierra (edafología, agricultura, geología, hidrología, geomorfología, glaciología, entre otras) ya que requieren de funciones específicas para el modelaje de las discontinuidades del terreno, principalmente redes de drenaje, de las que se requiere una representación muy precisa de ellos.

Se ha propuesto en la literatura, que algunas de las aplicaciones más inmediatas, serían: monitoreo de cuencas de drenaje para monitoreo de inundaciones y control de contaminantes, modelamiento de flujos hidrológicos, simulaciones para la creación de cuencas hidrológicas, interpretación y cartografía geológica, control de plagas y enfermedades en cultivos, potencialidades en agricultura. Derivado de las múltiples aplicaciones que conlleva un Modelo Digital de Elevación, es conveniente conocer y evaluar los métodos y técnicas actuales en este tipo de metodologías. La generación de Modelos Digitales de Elevación (MDE) a partir de imágenes de satélite ópticas de alta resolución espacial y su uso para la generación de información topográfica se debe considerar como una alternativa metodológica práctica y asequible para la modelación del terreno. Una amplia gama de procedimientos de corrección de imágenes de alta resolución por satélite (Ikonos, QuickBird, WorldView-2, GeoEye y EROS) proporcionan la elevación, a través del proceso de ortorectificación utilizando un conjunto de puntos de control terrestre.

Por lo tanto, un campo de investigación importante va a fijar áreas y ofrecer soluciones; en el transcurso de los últimos 15 años, diferentes algoritmos han sido desarrollados para intentar automatizar la extracción de MDE. El éxito de un cierto algoritmo depende generalmente del tipo de terreno y la calidad de imagen. Muchos problemas tienen sus efectos sobre la fiabilidad de los resultados, incluyendo la textura de imagen y contenido de las funciones urbanas y áreas forestales. Durante

el proceso de generación de un MDE automático, la fiabilidad del sistema está por lo general en comparación con otros sistemas o con los métodos analíticos tomados como referencia.

3. OBJETIVOS

Objetivo General

Elaborar un Modelo Digital de Elevación (MDE) con resolución espacial de 1.5 metros, mediante el uso de imágenes estereoscópicas de satélite de alta resolución espacial EROS-B.

Objetivos Particulares:

- Desarrollar el flujo de trabajo de un modelo metodológico que permita mediante técnicas de Teledetección Espacial y Sistemas de Información Geográficos, la elaboración de un Modelo Digital de Elevación mediante el uso de imágenes estereoscópicas de satélite de alta resolución espacial.
- Evaluar, mediante los datos del área de estudio, las precisiones horizontal y vertical del Modelo Digital de Elevación en valores de X, Y e Z (Longitud, Latitud y Altitud) en el terreno, mediante el uso de tecnología satelital GPS de alta precisión.

4. REVISIÓN DE LITERATURA

4.1. Definiciones y conceptos

Un MDE es un modelo matemático cuantitativo, en tres dimensiones de la superficie de la tierra derivada de los datos de elevación. Proporciona información básica sobre las características del terreno. Los atributos primarios, que se pueden derivar de los MDE, están: la pendiente, orientación, perfil curvatura y zona de influencia. Los atributos secundarios, que pueden derivarse de un MDE, son zona de pendiente ascendente, índice topográfico, el índice de poder de corriente, índice de radiación y el índice de temperatura (Wilson y Gallant, 2000). Un MDE se puede encontrar, en alguno de los tres formatos: el MDE basado en raster, la Red Irregular Triangular basado en vectores (TIN) y la estructura de almacenamiento basado en contorno. El TIN se considera que es MDE primario (medida) mientras que el MDE raster se considera que es (secundario) (Toppe, 1987). Cuando un MDE representa la superficie de la Tierra incluyendo altura del objeto (la altura del árbol, la altura del edificio, etc.), se refiere a menudo como un Modelo Digital de Superficie (MDS). Un modelo de la superficie de la tierra desnuda se conoce como un Modelo Digital del Terreno (MDT) (Li *et al.*, 2005).

Los Modelos digitales de elevación (MDE) proporcionan una representación digital del relieve de la Tierra, y se utilizan en una variedad de aplicaciones en el análisis geoespacial. Se requieren datos de elevación para producir imágenes raster geocodificadas y ortorectificadas, que a menudo se incorporan en un sistema de información geográfica. Este tema ha sido desarrollado en los últimos 30 años desde el lanzamiento del primer satélite civil de Teledetección (Toutin, 2000). Existen varios métodos para extraer MDE a partir de imágenes, tanto activos como pasivos

basados en sensores satelitales de datos derivados (clinometría, estereoscopía, interferometría, polarimetría y altimetría).

En fotogrametría moderna, "estereoscopía es la ciencia y arte que se ocupa del uso de las imágenes para producir un modelo visual 3D con características análogas a la de características reales se visualizan con verdadera visión binocular" (Laprade *et al.* 1966). La disparidad binocular (o paralaje) es la disparidad o la "diferencia" entre las imágenes de un objeto proyectado en cada retina.

El grado de disparidad entre las dos imágenes proyectadas depende del ángulo de convergencia. La disparidad binocular se utiliza en la fotogrametría estéreo para la extracción de elevación cuantitativa, y en consecuencia para generar MDE.

Se puede definir a un Modelo Digital de Elevación, como una estructura de datos numérica que representa la distribución espacial de la altitud de la superficie del terreno (Lee *et al.*, 2003). Un terreno real puede describirse de forma genérica como una función bivariable continua $z = \xi(x, y)$, donde z representa la altitud del terreno en el punto de coordenadas (x, y) y $\xi(x, y)$ es una función que relaciona la variable con su localización geográfica (Cuartero Suárez, 2003). Donde z es el valor de la altura que corresponde a un punto ubicado en las coordenadas "X" e "Y" en un sistema de proyección cartográfica.

Si se tiene un MDE, que es un raster de valores de elevación, entonces este es un contenedor de información, que representa al mundo como un arreglo regular de píxeles o celdas. Esta estructura es el resultado de superponer una retícula sobre el terreno y extraer la altitud media de cada celda (Felicísimo, 1994). Por lo que un MDE es un conjunto ordenado de números que representa la distribución espacial de

las elevaciones por encima de algún arbitrario Datum en el paisaje (Meijerink *et al.*, 1994).

La Extracción de MDE precisos, tiene demanda para su uso, en la planificación de inundaciones, generación de mapas, control de la erosión, la vigilancia ambiental, entre otros. La precisión de MDE basado en imágenes satelitales, depende principalmente de la resolución de la imagen, la altura y el contraste de la imagen. Actualmente, varias tecnologías diferentes están siendo utilizados para generar MDE de grandes áreas en varias resoluciones y precisiones, cada uno con su propia variación y limitación (Chekalin y Fomchenko, 2000).

Durante décadas las técnicas topográficas terrestres e imágenes aéreas fueron sólo los enfoques de la generación de MDE. La aparición de instrumentos de GPS, facilitó las técnicas convencionales, sin embargo, las dificultades como los elevados costos, un prolongado calendario de ejecución y zonas intransitables lo hacía un método muy complicado. Una alternativa se presentó, en el momento que estuvieron disponibles, imágenes estereoscópicas para datos globales de elevación digital, con el lanzamiento de la primera serie de satélites SPOT en 1986.

Debido a la complejidad técnica y elevado costo de desarrollo, durante 10 años (1990-2000) no se pudo desplegar una serie de satélites de alta resolución, como Early Bird-I 1997, EROS-A 1998, IKONOS-1 1999, QuickBird- 2000, OrbView-2001, la generación de imágenes comerciales de muy alta resolución comenzó con el lanzamiento de IKONOS el 24 de septiembre de 1999 (Sadeghian *et al.*, 2001).

Durante décadas las técnicas topográficas terrestres e imágenes aéreas eran las únicas aproximaciones disponibles para la generación de MDE. Sin embargo, con

el lanzamiento de los primeros satélites comerciales de muy alta resolución (VHR) IKONOS en septiembre de 1999 y QuickBird en octubre de 2001, la cartografía fotogramétrica aérea convencional a gran escala comenzó a tener serios competidores. Además, muchos de los nuevos satélites VHR (Very High Resolution), capaz de capturar imágenes pancromáticas de la superficie terrestre de 1 metro, e incluso inferior, como EROS B1, Resurs DK-1, KOMPSAT-2, IRS Cartosat 2, WorldView- 1, se iniciaron en 2006 y 2007, y que están ofreciendo a sus clientes de muy alta resolución de imágenes de la Tierra, con un tiempo muy breve de revisita. El rápido aumento de los satélites VHR comerciales en los últimos años se ha traducido en mejoras en la resolución, la disponibilidad y reduciendo el costo.

Por lo tanto, se han llevado a cabo muchos experimentos para evaluar los datos de Teledetección como nueva alternativa para la generación de MDE (Jacobson, 2002; Fraser, 2003; Toutin y Cheng, 2002; Amato *et al.*, 2004).

Debido a las características específicas de los satélites *pushbroom*, hay una necesidad de rediseñar y mejorar los modelos tradicionales de imágenes fotogramétricas tales como modelos rigurosos (Toutin, 1995). Además, muchos paquetes de software como ENVI, ERDAS, PCI Geomática, ArcGIS y muchos otros se utilizan ampliamente para extraer MDE de imágenes estéreo de muy alta resolución espacial. En consecuencia, no es un elemento esencial para la evaluación de todos los servicios incluidos en diferentes especificaciones de satélites ópticos VHR (Very High Resolution, Alta Resolución Espacial), diversos enfoques de la producción de MDE han logrado precisiones, a fin de elegir las mejores imágenes estéreo y métodos para usuarios científicos y comerciales.

El Modelo Digital de Elevación (MDE) muestra el relieve de la tierra en formato digital a intervalos horizontales espaciadas regularmente, y es requisito previo para correcciones geométricas, radiométricas y atmosféricas de instrumentos ópticos (Toutin, 2008). La ausencia de MDE precisos de gran parte de la tierra, así como las dificultades de otras técnicas como imágenes aéreas, topografía terrestre y el GPS, hacen que los científicos utilicen enfoques alternativos. Por lo tanto, los MDE de imágenes estéreo surgieron para llenar este vacío.

4.1.2 Métodos y técnicas actuales para la elaboración de un Modelo Digital de Elevación

4.1.3. Métodos directos

Los métodos básicos para la elaboración de un Modelo Digital de Elevación se pueden dividir en dos grupos:

Directos cuando las mediciones se realizan directamente en el terreno real e

Indirectos cuando se emplean documentos analógicos, digitales elaborados o programados previamente (Felicísimo, 1994). Dentro de los métodos directos podemos encontrar el uso de los siguientes instrumentos:

Altimetría: Altimetros radar o laser montados y transportados por plataformas aeroespaciales, satelitales y vehículos no tripulados. Actualmente la tecnología *LIDAR (Light Detection and Ranging)* es un procedimiento alternativo muy eficaz para la elaboración de MDE (Figura 1 y 2).

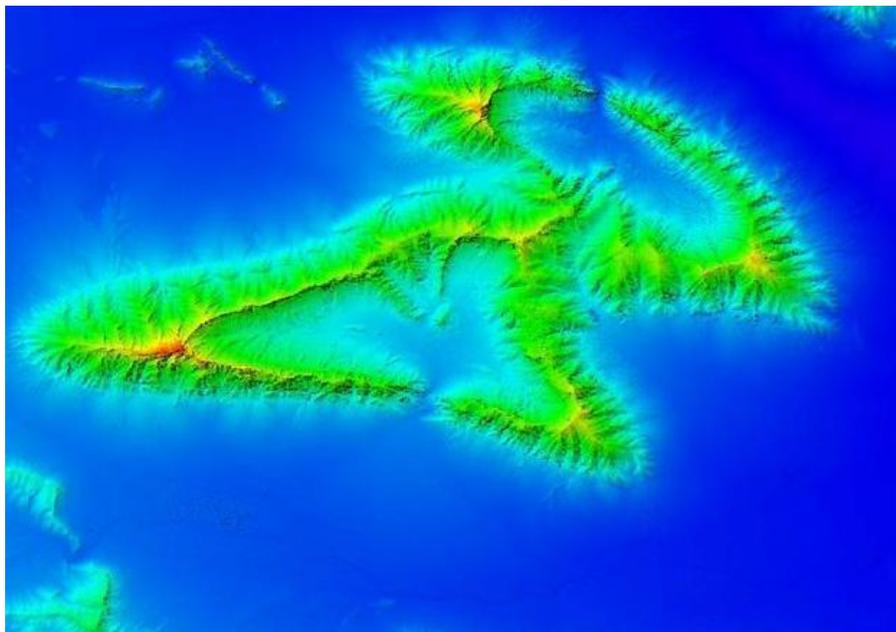


Figura 1. Modelo digital de elevación LIDAR de tipo terreno en perspectiva – Nuevo León

Fuente: INEGI

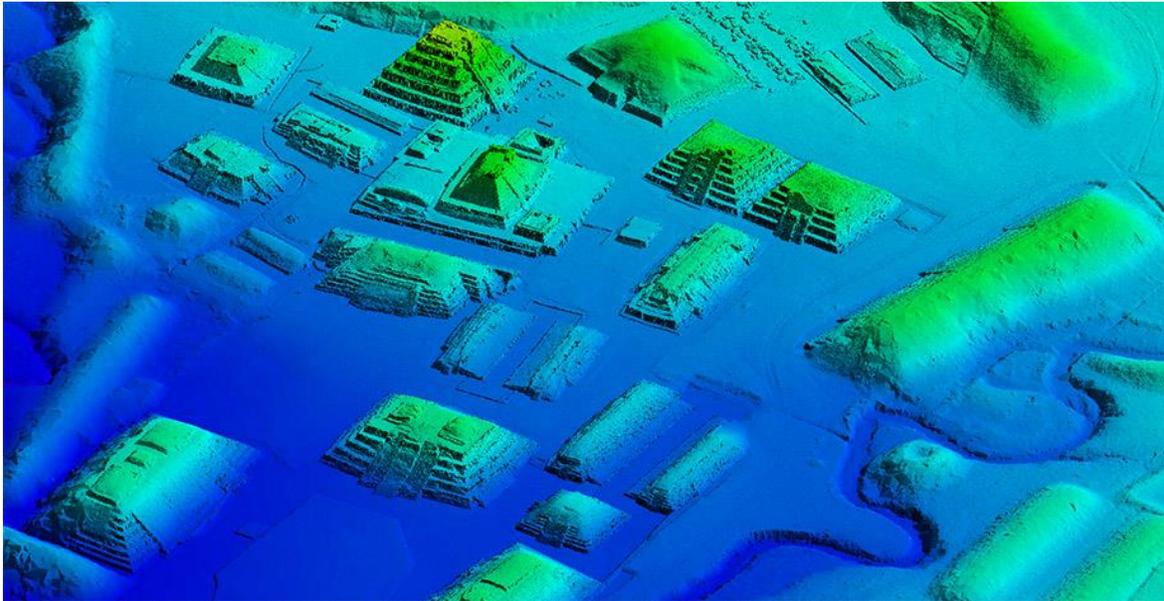


Figura 2. Modelo digital de elevación LIDAR de tipo superficie en perspectiva – Tajín

Fuente: SAP

GPS: Sistema de Posicionamiento Global

Sistema de medición tridimensional que utiliza señales de radio que proporciona el sistema NAVSTAR, esta constelación está integrado por 24 satélites artificiales que orbitan la Tierra en 12 horas (Torres y Villate 2001). Actualmente se conocen las constelaciones de NAVSTAR (Americano), GLONASS (Ruso) y GALILEO (Europeo). Los equipos GPS se dividen en navegadores, cartográficos y estaciones totales (Figura 3), estos dos últimos con capacidad para generar datos topográficos o MDE precisos.



Figura 3. Tipos de GPS

Levantamiento topográfico

Una de las opciones más accesibles de trabajo de campo, es el uso de estaciones topográficas con salida digital, una de las grandes ventajas de levantamientos con estación total es que la toma y registro de datos es automática, eliminando los errores de lectura, anotación, transcripción y cálculo; ya que con estas estaciones la toma de datos es automática (en forma digital) y los cálculos de coordenadas se realizan por medio de programas de computación incorporados a dichas estaciones (Casanova, 2002).



Figura 4. Levantamiento topográfico.

4.1.3. Métodos indirectos

Los métodos indirectos son aquellos que se realizan con datos previos existentes o preprogramados, es decir de fuentes secundarias; este tipo de método es mucho más común de utilizar. Las principales causas de la utilización de estos métodos, es debido principalmente a que no es necesario acceder físicamente a la zona de estudio, además de que la generación de los datos es relativamente rápida cuando se tienen que manejar grandes volúmenes de datos (Felicísimo, 1994). Los métodos indirectos, se pueden subdividir en dos grupos:

a) Digitalización de mapas topográficos

- *Automática:* Mediante escáner y vectorización por programa de cómputo

- *Manual:* Mediante la copia a través de un tablero digitalizador

b) Restitución a partir de pares de imágenes

- Fotografía aérea o fotogrametría
- Interferometría de radar
- Imágenes estereoscópicas de satélite

c) Digitalización de mapas topográficos

Automática

Mediante escáner y vectorización. La digitalización automática para abordar la construcción de los Modelos Digitales de Elevación es a través de archivos digitales previamente capturados o mediante el proceso de los mapa topográficos impresos en papel, volviéndolos digitales mediante el uso de un escáner. El escaneo es el proceso de digitalización que convierte una imagen impresa (analógica) en una imagen digital (Jackson, 1991). El documento original se pasa a través de un escáner el cual recorre la superficie del mapa con un sensor óptico y genera un documento digital con determinado número de valores de gris o de color, dependiendo del modelo y tipo; el cual puede ser manipulado posteriormente en un programa de cómputo de Sistema de Información Geográfico, el cual hace una conversión de la información de tipo raster a una de tipo vectorial; y que mediante determinados procesos técnico-especializados se logra generar un MDE de alguna zona de interés. Actualmente en el mercado existen muchos tipos de escáneres con diferencias en construcción, velocidad, resolución, tamaño de formato e incluso de precio.

Existen tres tipos principales de escáneres (Figura 5):

- **De sobremesa** (*flat-bed*). Los habituales para el uso doméstico o el escaneo de imágenes de pequeño formato, aunque también existen de mayor tamaño. El documento a escanear se sitúa sobre una placa de cristal bajo la que se desplaza la cabeza con el sensor.
- **De tambor**. El mapa se sitúa sobre un tambor que rota, mientras que la cabeza se mantiene fija.
- **Alimentados**. El sensor se mantiene fijo y el documento se desplaza mediante un mecanismo de arrastre, de forma similar a como avanza el papel en una impresora doméstica. Salvo que dispongan de mecanismos específicos para corregir esta circunstancia, suelen presentar importantes distorsiones geométricas causadas por un desplazamiento impreciso del papel.



Figura 5. Tipos de escáneres.

La vectorización automática es un proceso completamente distinto al de escaneo, y no es tan habitual en el ámbito de los SIG, principalmente debido a la mayor dificultad que entraña.

Manual

Mediante tablero digitalizador. La digitalización manual es una de las formas básicas para poder generar un MDE a partir de un documento cartográfico en papel, este se realiza mediante el uso de programas o software específico para digitalización y de un tablero o tableta digitalizadora (Figura 6), sobre el cual es colocado el mapa y las curvas de nivel se siguen manualmente con un cursor, de manera que el software (Figura 7) recibe a ciertos intervalos preestablecidos por el operador las coordenadas que definen la trayectoria de la línea.



Figura 6. Tabletas digitalizadoras.



Figura 7. Software para digitalizar.

d) Imágenes estereoscópicas digitales

Hasta hace algunos años los pares estereoscópicos eran exclusivamente de fotografías aéreas tomados por sensores aerotransportados (aviones), en vuelos a diferentes altitudes; actualmente se han integrado a estas fotografías las imágenes digitales tomadas por sensores espaciales transportados por satélites. Las imágenes estereoscópicas de satélite son las producidas por sensores satelitales que tienen la capacidad de poder observar los objetos o elementos presentes en una escena o paisaje en diferentes perspectivas o ángulos de observación, en las figuras 8 a 13 podemos observar algunas imágenes estereoscópicas así como la obtención de Modelos Digitales de Elevación a partir de ellas.



Figura 8. Imagen estereoscópica pancromática de satélite Pléyades 50 cm.

4.1.4 Aspectos básicos de la Estereoscopía en MDE

Para obtener imágenes estereoscópicas de satélites basados en sensores VNIR (visible e infrarrojo cercano), dos soluciones son posibles:

- Estereoscopía a lo largo de la misma órbita usando imágenes *before* y *after* (antes y después, por su denominación en inglés).
- A través de la estereoscopía a lo largo de dos órbitas diferentes.

Tres ejemplos de la última solución utilizado desde la década de 1980 son los siguientes: uso de los datos de Landsat de dos órbitas diferentes (Welch y Lo, 1977); SPOT-1 datos utilizados con capacidades de dirección transversal a la trayectoria (CNES 1987), y finalmente, los datos IRS-1C/ D que utilizan haciendo rodar el satélite (Gopala Krishna *et al.*, 1996). Esta solución se aplicó también a sensores mixtos (Welch *et al.*, 1990). Desde 1990, la primera solución fue popularmente aceptada con los sensores de resolución media, por ejemplo, JERS-1 OPS, los MOMS (*German Modular Opto-Electronic Multi-Spectral Stereo Scanner*) (Raggam *et al.*, 1997), ASTER-VNIR (Toutin 2002; Maruyama *et al.*, 1994; Toutin y Cheng 2002; Käab 2002, 2005; Hirano *et al.*, 2003), y SPOT5-HRS (Bouillon *et al.*, 2006; Toutin, 2006). En los últimos años, la mayoría de los nuevos sensores de alta resolución (FORMOSAT-2, CARTOSAT-1, ALOS PRISM, CBERS-2B, etc.) y los satélites ágiles de muy alta resolución (Ikonos, QuickBird, Orbview, EROS, WorldView-1) también han adoptado esta solución (Toutin, 2004).

Los Modelos Digitales de Elevación resultantes del uso de imágenes estereoscópicas de satélite tienen una calidad comparable a los generados mediante métodos fotogramétricos tradicionales según algunos autores (Kaufmann y Haja,

1988). En el mercado existe una gran cantidad de satélites que proporcionan imágenes estereoscópicas con múltiples características de toma, que permiten realizar Modelos Digitales de Elevación con distintas precisiones de localización y resoluciones espaciales.

Especificaciones de satélites ópticos de muy alta resolución con la capacidad de producir imágenes estéreo se resumen en el Cuadro 1. Los satélites ópticos de VHR giran en órbita sincronizada con el sol (400-900 kilómetros), que ofrece la proximidad a la superficie de la Tierra, así como aligeramiento consistente. Además, la órbita sincronizada con el sol ofrece la recopilación de imágenes de un mismo punto de la superficie de la Tierra a la misma hora local cada día.

Cuadro 1. Especificaciones de satélites ópticos de muy alta resolución contemporáneos, capaces de producir imágenes estéreo.

Satélite	País	Lanzamiento	Resolución Espacial (m) *PAN	Resolución Espacial (m) *MUL	Tamaño Escena (km)
IKONOS-2	USA	24/09/99	1.0	4	11
Quick Bird-2	USA	18/10/01	0.61	2.44	16
EROS-B1	Israel	25/04/06	0.7	ND	7
Resurs DK-1	Rusia	15/06/06	1.0	3	28
KOMPSAT-2	Corea	28/07/06	1.0	4	15
IRS Cartosat 2	India	10/01/07	0.8	*ND	10
WorldView-1	US	18/09/07	0.5	*ND	16
GeoEye-1	US	09/06/08	0.41*	1.65*	15
WorldView-2	US	10/08/09	0.46*	1.84*	16
TH-1	China	24/08/10	5 Tripleta Stereo	10	60
Pleiades-1	Francia	16/12/11	0.5	2	20
Pleiades-1b	Francia	02/12/12	0.7	2	20
KOMPSAT-3	Corea	17/05/12	0.7	2.8	16.8

*ND: No Disponible; PAN= Pancromática; MUL= Multiespectral

* La distribución y uso de imágenes con resolución menor a 0.5 m en pancromático y de 2 m en multiespectral estará sujeta a la aprobación del Gobierno de los Estados Unidos.

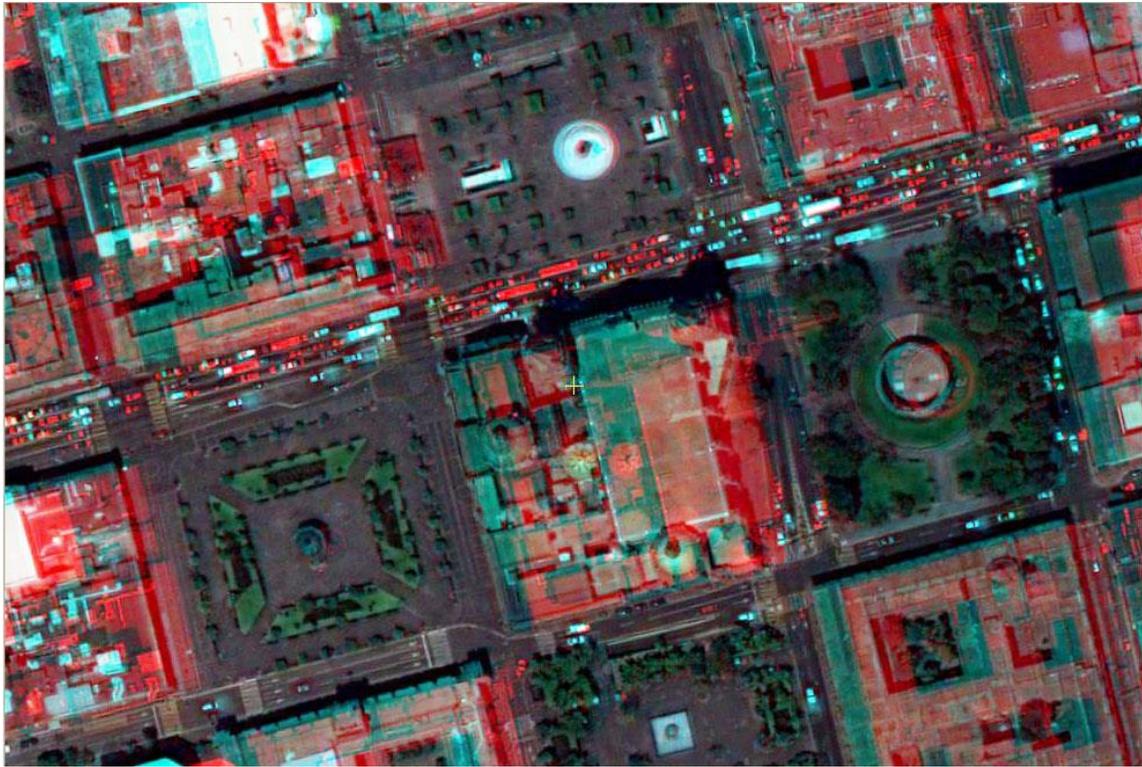


Figura 9. Imagen estereoscópica de satélite GeoEye 50 cm.

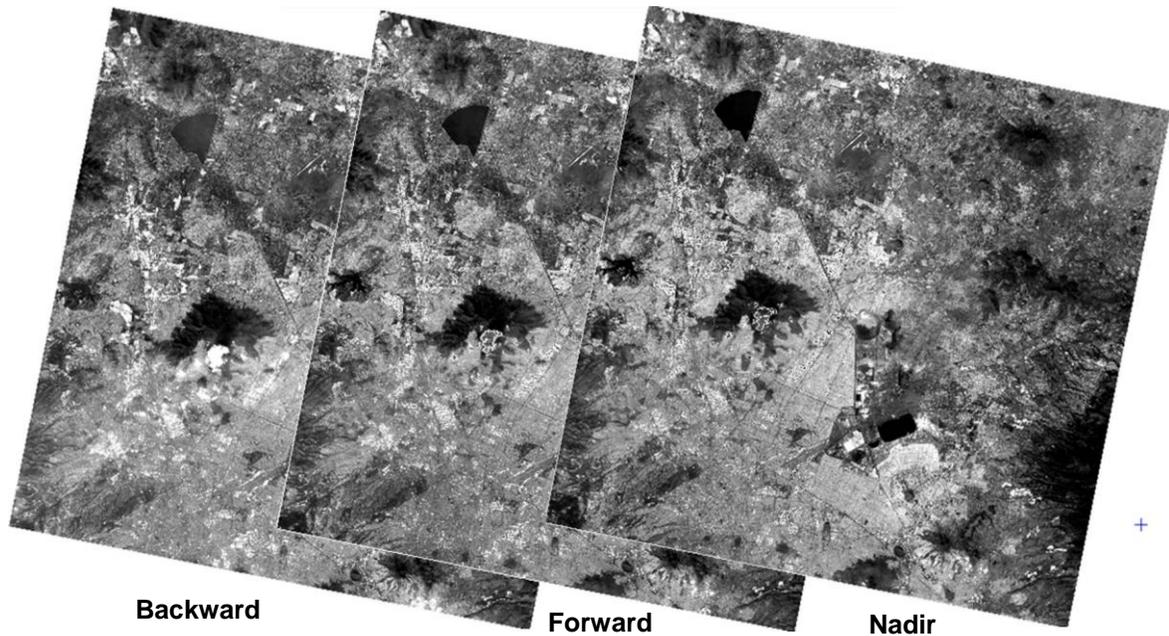


Figura 10. Tripletta estereoscópica de satélite TH-1 a 5 metros, Pancromático (0.51 - 0.69 μm).
Centro-Norte Ciudad de México, Fuente: Cloud Mapping Technologies

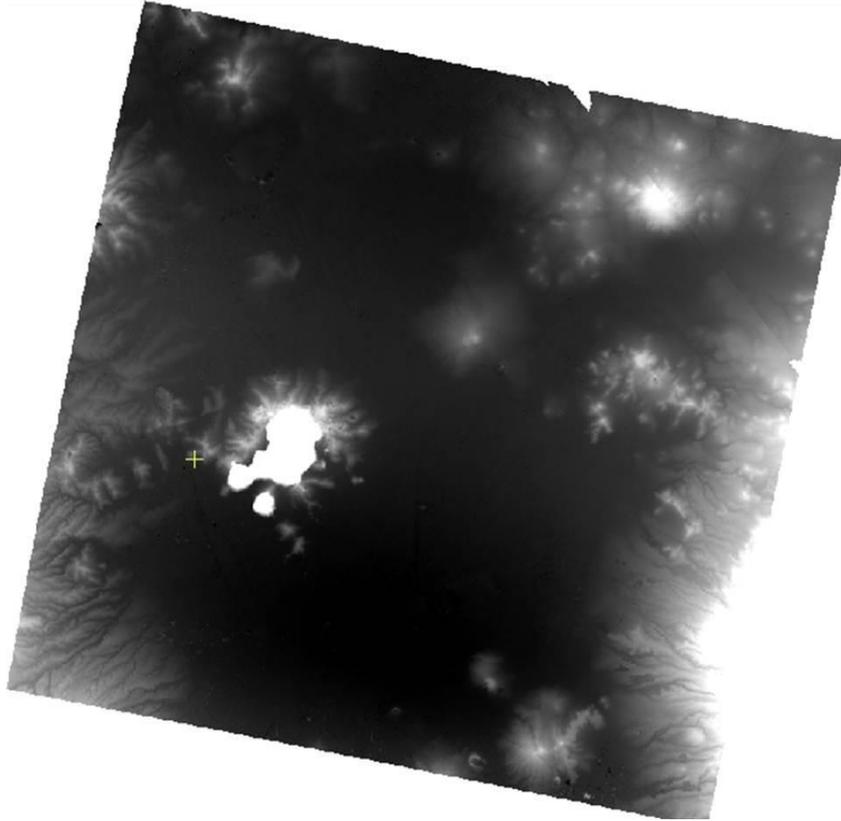


Figura 11. MDE extraído de tripleta estereoscópica del satélite con resolución espacial de 10 metros. Centro-Norte Ciudad de México, Fuente: Cloud Mapping Technologies

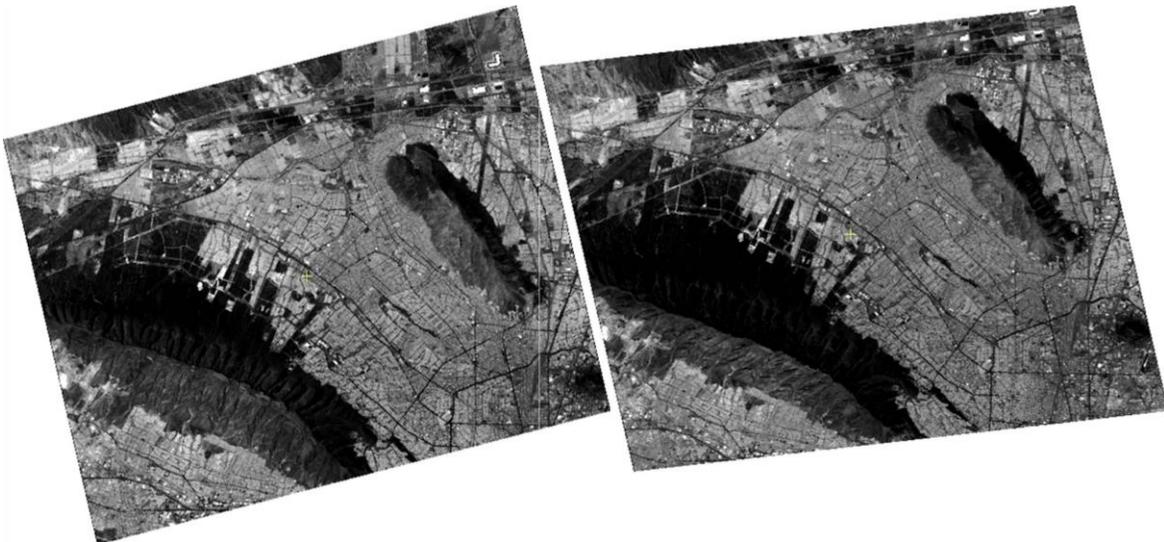


Figura 12. Imagen estereoscópica del satélite Kompsat-3 a 70 cm, Pancromático (0.51 - 0.69 μm). Norte Ciudad de Monterrey; Fuente: Cloud Mapping Technologies

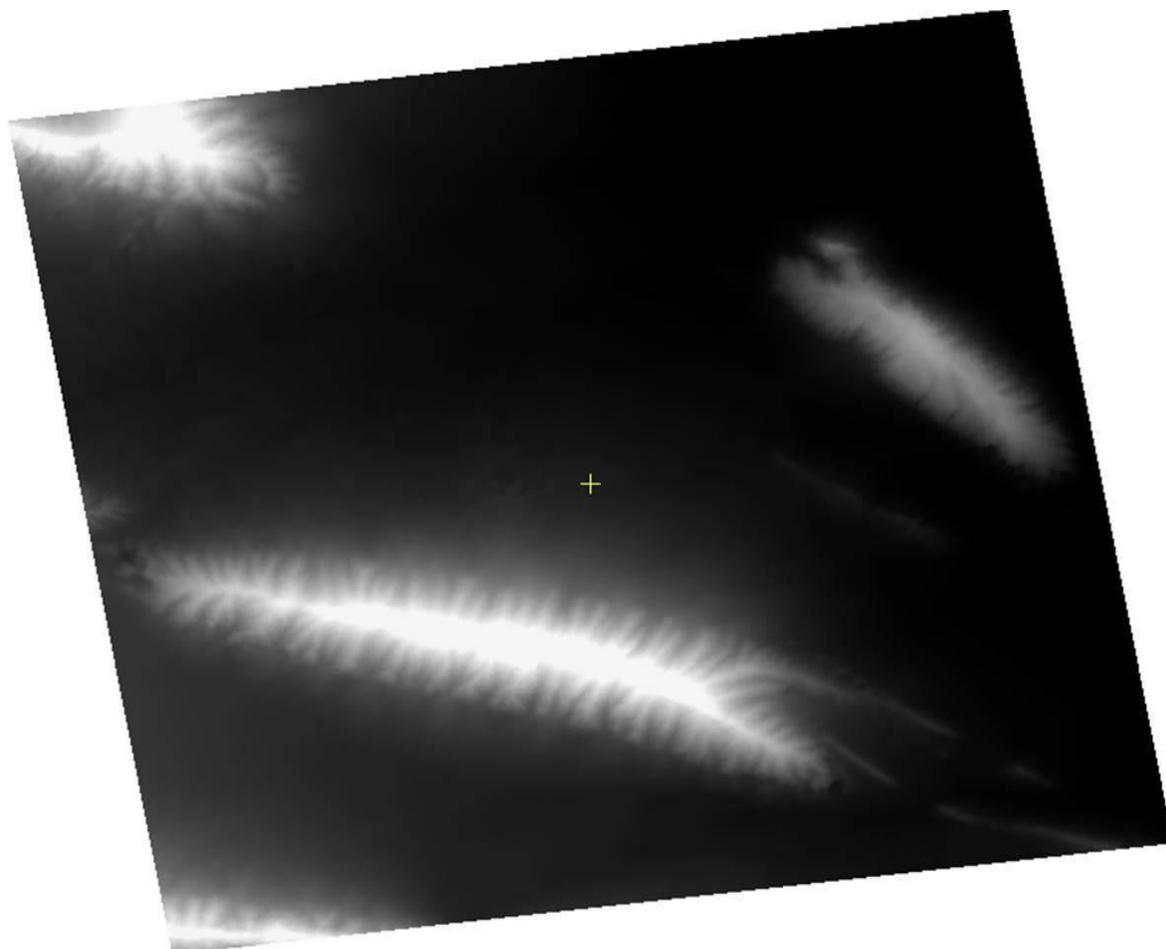


Figura 13. MDE extraído de imagen estereoscópica del satélite Kompsat-3 con resolución espacial de 1.5 metros. Norte Ciudad de Monterrey; Fuente: Cloud Mapping Technologies

4.1.5 Imágenes Estereoscópicas Analógicas

La fotogrametría analógica surge en la década de los años treinta del siglo XX, basada en aparatos de restitución y es la responsable de la realización de la mayoría de la cartografía a nivel mundial. En ella, un par de fotografías es colocado en un aparato restituidor de tipo óptico o mecánico. El operador realiza en forma manual la orientación interior y exterior para crear el modelo estereoscópico debidamente escalado y nivelado. Las fotografías aéreas permiten realizar la visión estereoscópica que se basa en la característica de la visión humana y en la separación de, aproximadamente 65 mm., que existe de separación entre nuestros ojos.

Estas reciben cada uno una imagen diferente del mismo objeto que el cerebro une creando el efecto de tridimensionalidad.

Para conseguir la visión en tres dimensiones se inventó un aparato llamado estereoscopio (figura 14). Con él las fotografías aéreas verticales consecutivas (Figura 15) de una misma corrida de vuelo se colocan una al lado de otra y pueden ser vistas de manera que el cerebro las integre en una sola.



Figura 14. Estereoscopio de bolsillo



Figura 15. Fotografías aéreas analógicas consecutivas

4.1.6 Generación de MED de Visión estereoscópica

En comparación con los métodos manuales tradicionales que utilizan los operadores humanos, los métodos automatizados para generación de MDE proporcionan productos eficientes, económicos y razonablemente precisos, que cubren áreas extensas de la superficie de la Tierra. La Teledetección de la superficie de la Tierra comenzó con las cámaras de película fotográfica y ha ido evolucionando a las cámaras digitales con las bandas de detección selectiva, por ejemplo, multiespectral, térmica, hiperespectral, y radar. Al igual que con toda la reconstrucción 3D estéreo, se requieren dos o más imágenes que detectan una escena con áreas superpuestas. Un par de imágenes estéreo se puede formar por la disposición de sensores como se muestra en la Figura 16.

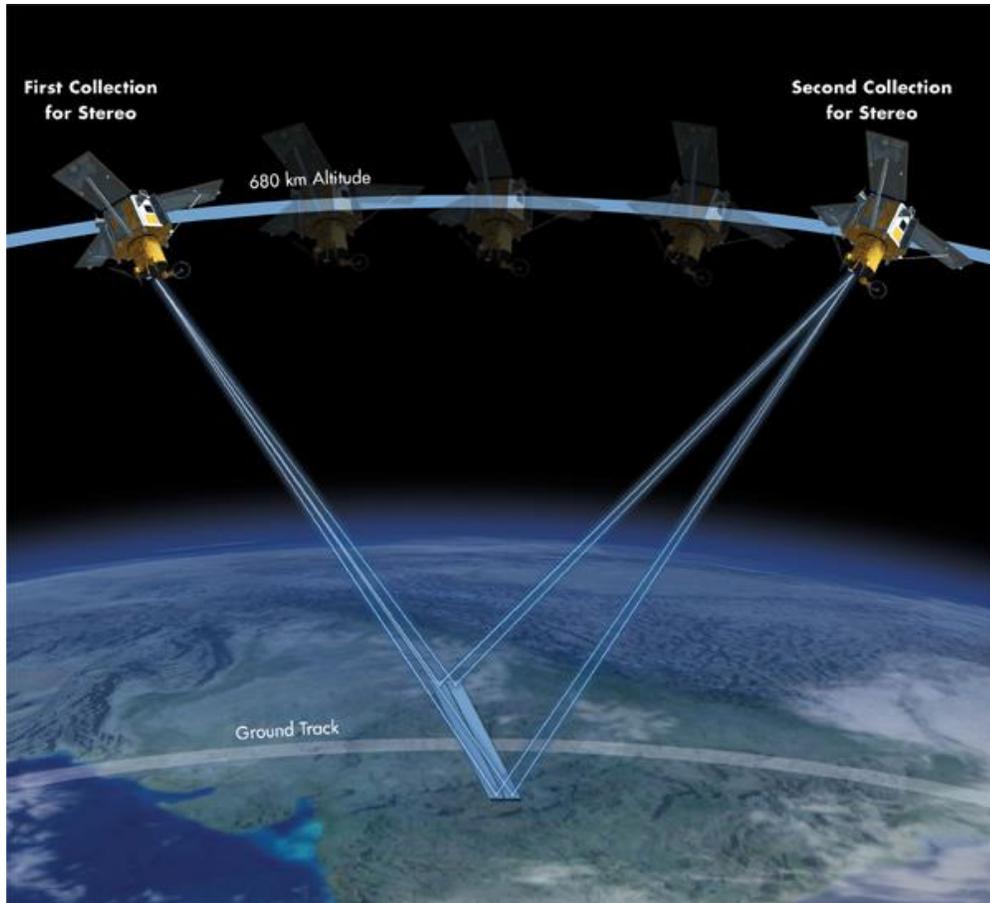


Figura 16. Captura de imagen estereoscópica por sensores espaciales

A lo largo del recorrido está definida por el movimiento hacia adelante del satélite a lo largo de su trayectoria orbital, mientras que al otro lado se refiere a un satélite que viaja en diferentes órbitas, por lo tanto, imágenes que cubren la misma zona se toman de diferentes órbitas. En general, un par estéreo capturado en una misión tiene un intervalo de tiempo más corto entre dos imágenes (Lillesand *et al.*, 2004).

Por lo tanto las condiciones climáticas variables tienen menos efecto en pares estéreo en estos escenarios de imagen pasivos. La distancia entre dos sensores se

llama la línea de base (B), y la distancia nadir (distancia vertical) desde el satélite a tierra se conoce como la altura (H), como se ilustra en la Figura 17. La base de altura (B / H) relación es un parámetro clave en la generación del MDE de imágenes estereoscópicas. Es un criterio para elegir un número suficiente de pares estéreo de las mismas o diferentes órbitas.

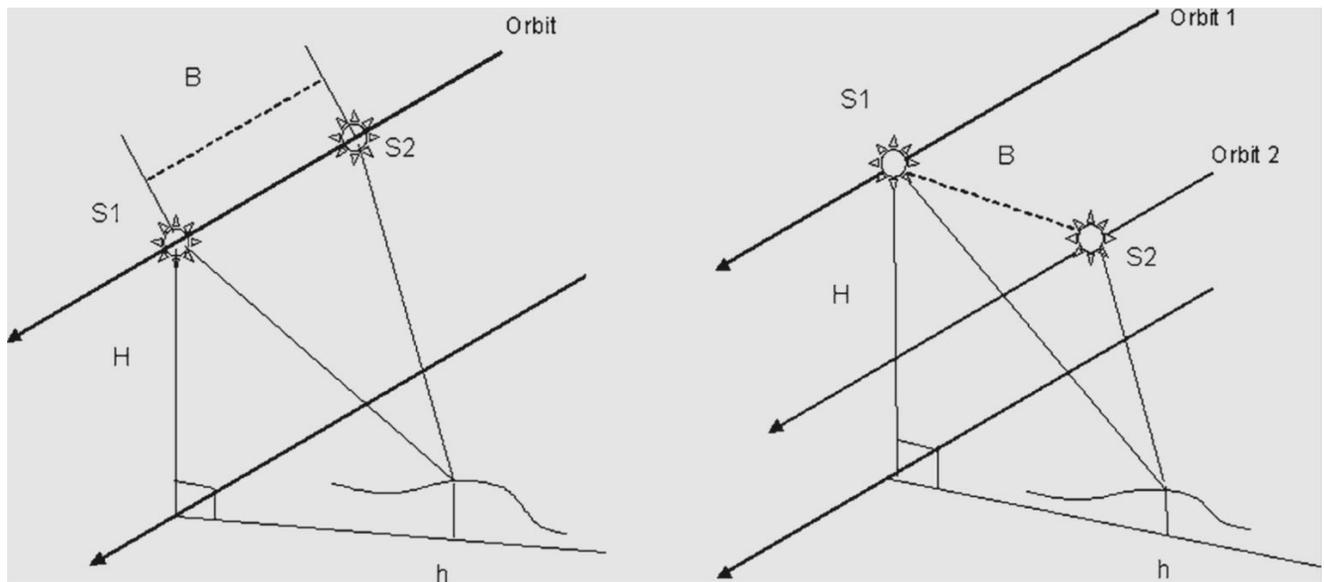


Figura 17. Generación de MDE de imágenes de satélite estereoscópicas. Las flechas se refieren a la dirección del satélite de vuelo. Las líneas de bajo con flechas son la proyección ortográfica de la órbita en el suelo. Órbitas 1 y 2 son dos órbitas designadas que cumplan los requisitos de pares estéreo. Izquierda: A lo largo del track (ruta en inglés). Derecha: Al otro lado del track (ruta en inglés).

La primera misión espacial para ofrecer imágenes estereoscópicas de la superficie de la Tierra fue, el programa estadounidense de satélites espía CORONA2. Durante las últimas décadas, una serie de satélites de observación de la Tierra se han lanzado con sistemas de imágenes de alta resolución, como Landsat (1972), IKONOS (1999), QUICKBIRD (2001), SPOT-5 (2002), ENVISAT (2002), ALOS (2006) y GeoEye-1 (2008). Imágenes estéreo adquiridas por estos satélites pueden ser pares de imágenes a lo largo del *track* o pares de imágenes a través del

track. La Generación del MDE a partir de un par de la imagen estereoscópica implica los siguientes procesos (Gabet, 1997; Hashimoto, 2000).

- Pre-procesamiento de pares de imágenes para la eliminación de ruido: este es un proceso para mitigar los efectos de ruido introducidos por los sensores de imagen.
- Adaptación de la Imagen: este es el proceso de encontrar los puntos correspondientes en dos o más imágenes y es implementado por cualquiera de las áreas en función o basada en juego, o una combinación de ambos.
- El proceso de triangulación: coordenadas de los puntos coincidentes de los pares de imágenes se transforman en coordenadas del terreno utilizando parámetros interiores y exteriores de las cámaras.

Este proceso implica el modelado geométrico del sistema de cámara satélite y sistema de coordenadas de la tierra.

- Evaluación del MDE: este proceso se puede lograr por medio de puntos de control terrestre (GCP), si está disponible.

En el siglo XXI, los investigadores han continuado sus esfuerzos en la generación de MDE automatizados a través de imágenes de satélite y desarrollando metodologías destinadas a mejorar la precisión y el nivel de automatización. Los softwares comerciales, tales como PCI Geomática, Desktop Mapping System, ERDAS Imagine, ENVI, han evolucionado a la misma velocidad que la nueva disponibilidad de información satelital, de tal manera que ofrecen nuevas características de uso,

incluyendo algoritmos para la generación de MDE de imágenes estereoscópicas (Lowe, 2004).

4.2 Generación de Algoritmos en los MDE

Existen numerosos factores que implican en el enfoque aplicado para la producción de MDE como; la resolución de la imagen, disponibilidad de parámetros de posición, número y distribución de los GCP, morfología del área de estudio y la aplicación final del MDE. La Figura 18 ilustra el flujo de trabajo de la generación de un MDE automático. Después de pre-procesamiento (Vassilopolou *et al.*, 2002; Fraser, 2002), que depende de la calidad de la imagen, así como el uso final del MDE, se utilizan modelos matemáticos para georeferenciar las imágenes estéreo¹. La geometría sofisticada de las imágenes del espacio atribuye a diversos centros de perspectiva, modo de barrido y datos de actitud para rediseñar y mejorar los modelos fotogramétricos convencionales.

La georeferenciación es seguido por la generación de imágenes epipolar lo que reduce el tiempo de búsqueda de puntos correspondientes en la imagen (Zhang y Gruen, 2006). Durante la comparación de imágenes y los puntos comunes en el área solapada de imágenes estéreo son identificados y medidos.

De 2000 a 2006, el LP DAAC (*The Land Processes Distributed Active Archive Center*) utilizó el software fotogramétrico OrthoEngine del PCI Geomatica para producir productos DEM ASTER estándar. Las capacidades de este software para procesar datos estéreo ASTER se desarrollaron en 1999 bajo contrato de la USGS,

¹ En general los modelos matemáticos utilizados, se clasifican en modelo riguroso (Kornus, 2006) y el modelo genérico (Madani, 1999; Sadeghian, 2001; Lucchese, 2006).

con la colaboración del Centro Canadiense de Percepción Remota, y el Ministerio de Recursos Naturales de Canadá para los aspectos de modelado matemático y 3D (Toutin, 1995, 2002).

Los MDE requieren un mínimo teórico de seis Puntos de control (GCP), suministrados por el usuario para producir el producto MDE. Sin embargo, el número de GCP depende principalmente de su fuente y precisión. Cuando los GCP no son lo suficientemente precisos (entre 5 a 10 m), un número mayor de ellos es necesario para reducir la propagación de errores GCP, en el ajuste por mínimos cuadrados. Según lo descrito por Clavet *et al.*, (1993), las principales fuentes de GCP utilizados en fotogrametría satélite son las siguientes: (a) los mapas topográficos, (b) la triangulación fotogramétrica de reconocimientos aéreos, y (c) Sistema de posicionamiento global (GPS). Por otro lado, a pesar de la alta exactitud diferencial GPS, se requieren un gran número de puntos, lo que aumenta el costo de manera considerable. Los mapas topográficos son los datos de control más accesibles para la mayoría de las áreas terrestres del mundo, pero su utilidad depende de la escala, la fuente, y el formato (papel, vector en formato digital). Los mapas topográficos a escala 1: 25.000, así como receptores GPS portátiles de bajo costo proporcionan 05-10 metros de precisión con los GCP; de 6-8 GCP son por lo general una cantidad suficiente para procesar un MDE. A escala 1: 50.000, los GCP son 10-15 m son precisos; y de 10-12 GCP son suficientes. Por último, los mapas a escala 1: 100 000 con 15-30 m de precisión de los GCP; y de 15-20 GCP se considera adecuada.

5. MATERIALES Y MÉTODOS

5.1. Ubicación espacial y aspectos generales de la zona de estudio

El desarrollo del proyecto de investigación, se ubica en el Estado de México el cual se localiza en la zona central de la República Mexicana, en la parte oriental de la mesa de Anáhuac y se ubica geográficamente entre los paralelos 18° 21' y 20° 17' de latitud norte y 98° 36' y 100° 36' de longitud oeste (Figura 19).

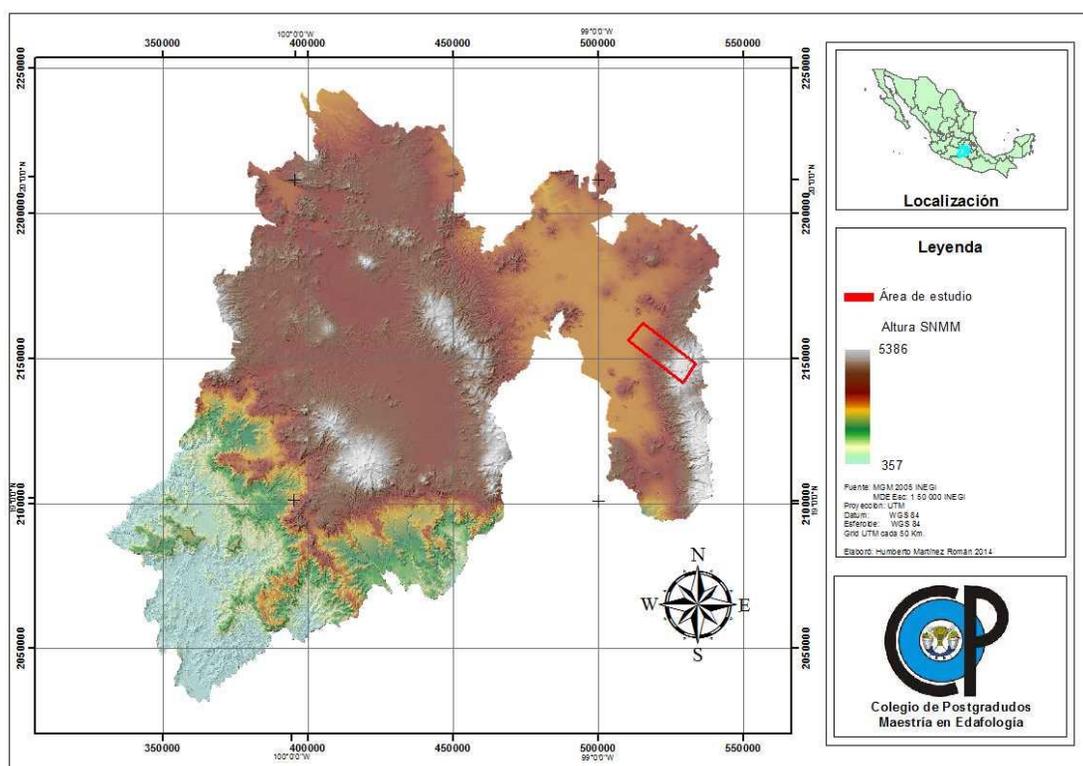


Figura 19. Localización geográfica del área de estudio.

El área de estudio cuenta con una superficie de 18,455 Has, en el municipio de Texcoco se encuentra la mayor parte del área con 92.4%, este se encuentra situado geográficamente en la parte este de Estado de México y colinda al norte

con los municipios de Chiautla, Chiconcuac, Tepetlaoxtoc y Papalotla con el 0.2% del área; al sur con los municipios de Chimalhuacán, Chicoloapan e Ixtapaluca en este último se encuentra el 7.4 % del área; las coordenadas extremas del área de estudio son las siguientes: 98°54'0.8855"W 19°30'6.4473"N; 98°51'18.3432"W 19°33'23.8684"N; 98°40'48.0274"W 19°25'42.1316"N; 98°43'20.7873"W 19°22'8.5107"N (Figura 20).

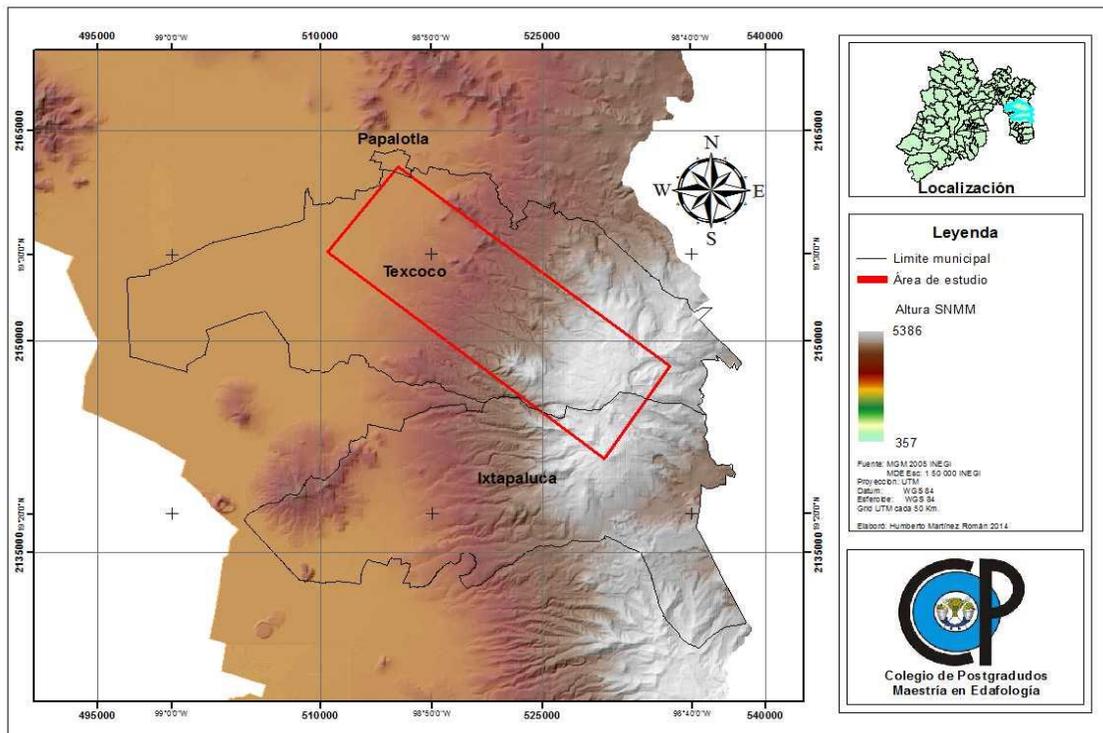


Figura 20. Localización del área de estudio.

Dentro de esta área de estudio se encuentra cubierta en su totalidad la subcuenca del río Texcoco (Figura 21). Cuyas coordenadas extremas son: Long: 98°52'24.8933"W Lat.: 19°31'24.5956"N y Long: 98°43'5.6351"W Lat.: 19°24'53.4082"N, y cuenta con una superficie aproximada de 3,662 hectáreas, esta subcuenca pertenece a la Región Hidrográfica 26-Panuco, Subregión

Hidrológica Valle de México, en la zona conocida como Cuenca Oriental del Valle de México, integrada por 13 subcuencas en total (CONAGUA, 2007).

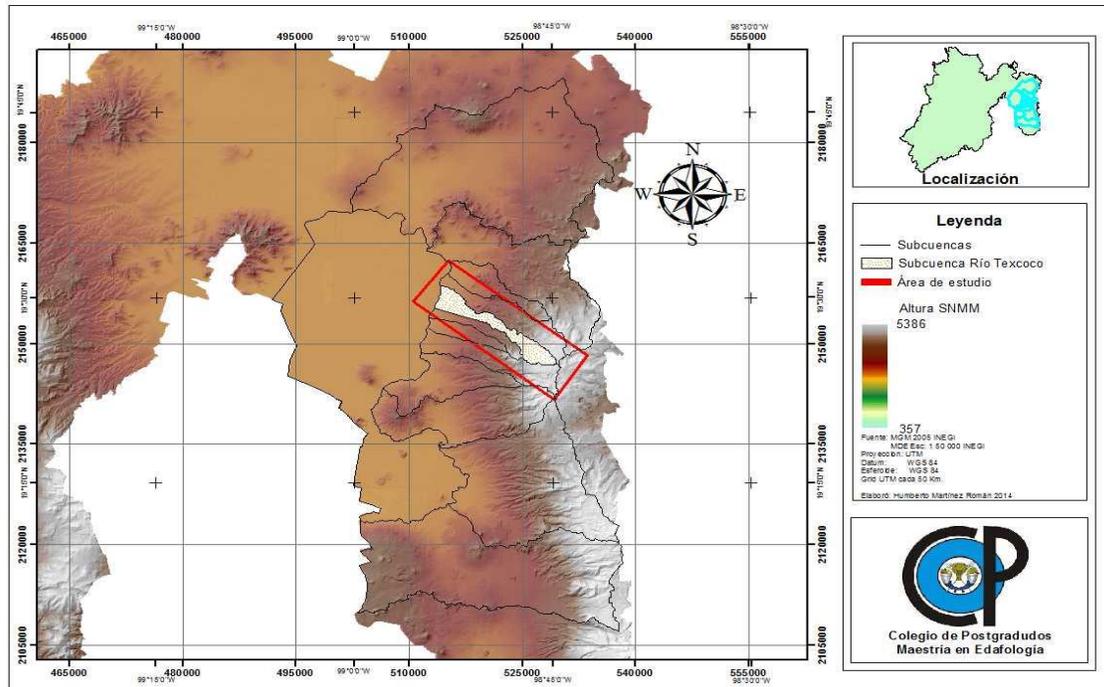


Figura 21. Subcuencas de la cuenca oriental del Valle de México.

El sureste de esta zona de estudio pertenece al Área Natural Protegida Parque Nacional Iztaccíhuatl Popocatepetl a la subzona de preservación dentro del Polígono 1. Tláloc–Telapón el cual abarca una superficie de 2,425.371 hectáreas, conformada por los cerros Tláloc y Telapón, ubicado en la parte norte del Parque, abarca parte de los municipios de Ixtapaluca y Texcoco en el Estado de México y Santa Rita Tlahuapán, en el Estado de Puebla. La principal altura corresponde a la cumbre del Tláloc que se ubica a los 4,120 msnm., comprende un sistema ecológico con un buen grado de conservación el cual se busca conservar para mantener el equilibrio climático y el régimen hidráulico. Esta superficie presenta una serie de escurrimientos cuyo recorrido es accidentado

debido a las condiciones de la serranía, además, su caudal es tan variable como lo son la intensidad y la frecuencia de las lluvias. Estos arroyos dan lugar a los ríos Purificación, Xalapango, Coaxacoaco, Texcoco, Chapingo, San Bernardino, Tejocote, Santa Mónica y Coatepec.

En las partes por arriba de los 4,000 msnm se distribuyen diversas especies de zacatonal (*Calamagrostis tolucensis*, *Festuca hephaestophila*, *F. livida*, *F. tolucensis*, *Muhlenbergia macroura* y *M. quadridentata*); en las laderas existen claros de bosque y cañadas en donde se distribuye bosque de pino-oyamel (*Pinus hartwegii* y *Abies religiosa*). Algunas zonas con alteraciones ambientales están cubiertas de zacatonal asociado con leguminosas del género *Lupinus spp.* (DOF, 2013).

La parte centro de la zona de estudio está compuesta por algunas localidades rurales como Apatzingo, San Pablo Ixayoc y San Camilo y la Localidad urbana de Santa Catarina del Monte, dentro de esta zona las principales actividades son la agricultura y la minería para la extracción principalmente de arena y grava por parte de grandes empresas cementeras que ofrece empleos y recursos económicos para los habitantes de la zona; la parte Noroeste de la zona está compuesta principalmente por localidades urbanas y rurales cuyas principales actividades son de tipo comercial y agropecuarias; en su totalidad esta área de estudio está compuesta por 21 localidades urbanas y 21 localidades rurales (Figura 22 y Tabla 1)

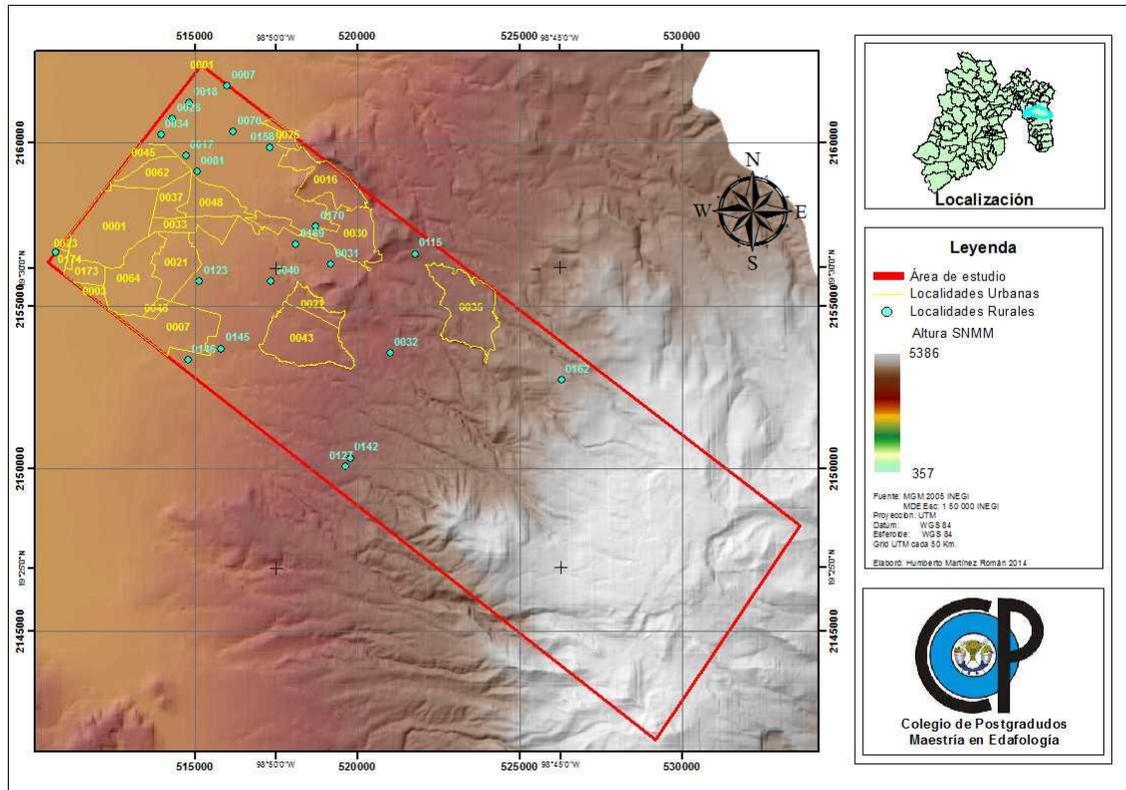


Figura 22. Localidades urbanas y rurales. Fuente: INEGI 2013.

Cuadro 2. Localidades urbanas y rurales. Fuente INEGI 2013.

LOCALIDADES URBANAS Y RURALES			
CVE_LOC	LOCALIDADES RURALES	CVE_LOC	LOCALIDADES URBANAS
0007	Rancho San Rafael	0001	Papalotla
0017	La Resurrección	0001	Texcoco de Mora
0018	Los Reyes San Salvador	0003	El Cooperativo
0026	San José Texopa	0007	San Luis Huexotla
0031	San Nicolás Tlaminca	0016	La Purificación Tepetitla
0032	San Pablo Ixayoc	0021	San Diego
0034	San Simón	0022	San Dieguito Xochimanca
0040	Santa María Nativitas	0023	San Felipe
0070	Xalapango	0025	San Joaquín Coapango
0081	El Batán	0030	San Miguel Tlaxpan
0115	Apatzingo	0033	San Sebastián
0123	Ejido de Nativitas	0035	Santa Catarina del Monte
0127	San Camilo	0037	Santa Cruz de Arriba
0142	Los Niños de San Francisco de Asís [Casa Hogar]	0043	Tequexquihuac
0144	Los Sauces	0045	Santa María Tulantongo
0145	Rancho Buenavista	0046	Unidad Habitacional Emiliano Zapata-ISSSTE
0146	Tecaxhe la Escondida	0048	Xocotlán
0158	Ejidos de la Purificación	0062	Santiaguillo
0162	Tlapahuetzia	0064	La Trinidad
0169	Ejido Tlaminca de Texcotzingo (Ejido San Nicolás Tlaminca)	0173	Salitrería
0170	San Esteban (San Miguel Tlaxpan)	0174	Unidad Habitacional Embotelladores

En las condiciones orográficas que se presentan en la zona, se pueden encontrar elevaciones desde los 2230 hasta los 4125 Metros Sobre el Nivel Medio del Mar (Figura 23. Fuente: MDE Esc: 1: 50 000 R_15 metros).

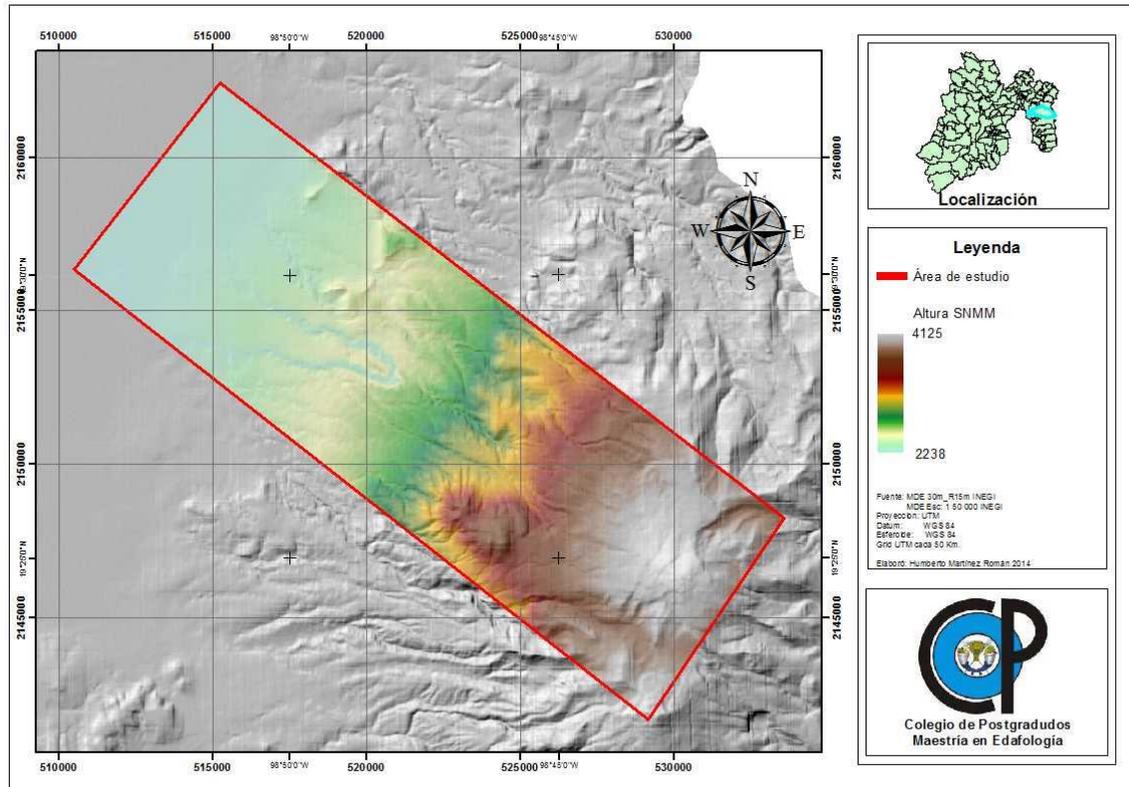


Figura 23. Elevaciones. Fuente: INEGI 2013.

Debido a estas condiciones orográficas de esta zona, así como sus variaciones altitudinales, se encuentran grupos de climas BS1kw(w)(i)g Clima seco estepario, semiárido-templado (el menos seco de los secos), lluvia invernal inferior al 5%, con reducida oscilación térmica y la temperatura más elevada ocurre antes del solsticio de verano; C(w1)(w)b(i)g Clima templado, subhúmedo (humedad moderada), de verano largo, con precipitación de invierno inferior al 5%, posee una oscilación térmica y la temperatura más alta ocurre antes del solsticio de verano; C(w2)(w)b(i)g Clima templado, subhúmedo con verano largo, lluvia

invernal inferior al 5%, es isotermal y la temperatura más elevada se manifiesta antes del solsticio de verano y en la parte más alta C(E)(w2)(w)b(i)g Clima semifrío, subhúmedo, con porcentaje de precipitación invernal menor a 5, el verano es largo, es isotermal y la temperatura más elevada se presenta antes del solsticio de verano. (CONABIO, 2001). (Figura 24.).

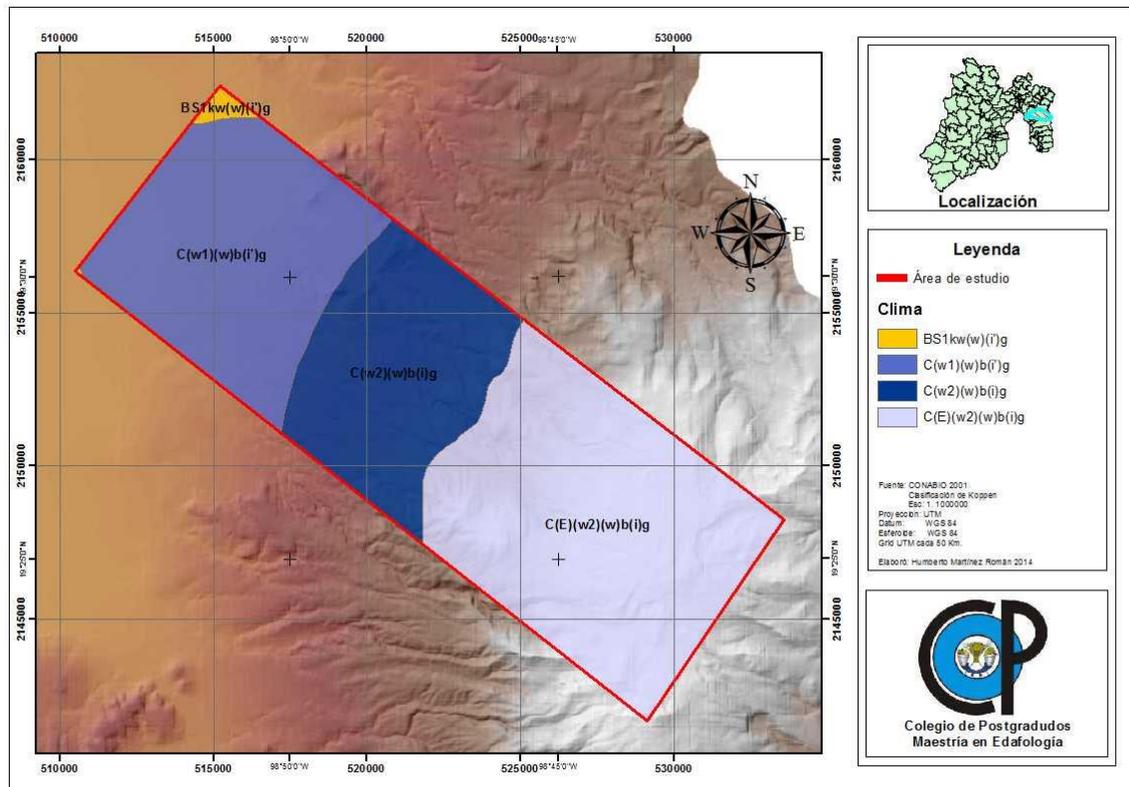


Figura 24. Grupos climáticos.

Dentro de esta zona de estudio existen las siguientes unidades de suelos: Cambisol dístico, Luvisol humbrúmico, Phaozem epipetrodúrico, Phaozem páquico y Vertisol sódico (INEGI, 1991) como lo ilustra la figura 25.

Por otro lado los factores ambientales así como el uso al que han sido sometidos ha modificado algunos de ellos, por ejemplo, en la parte central donde se ha erosionado casi todo el suelo superficial y ha permitido la visibilidad del

material parental o tepetate; sin embargo, los suelos de la parte alta casi no han sido erosionados debido a su abundante cobertura vegetal (Figuroa, 1975).

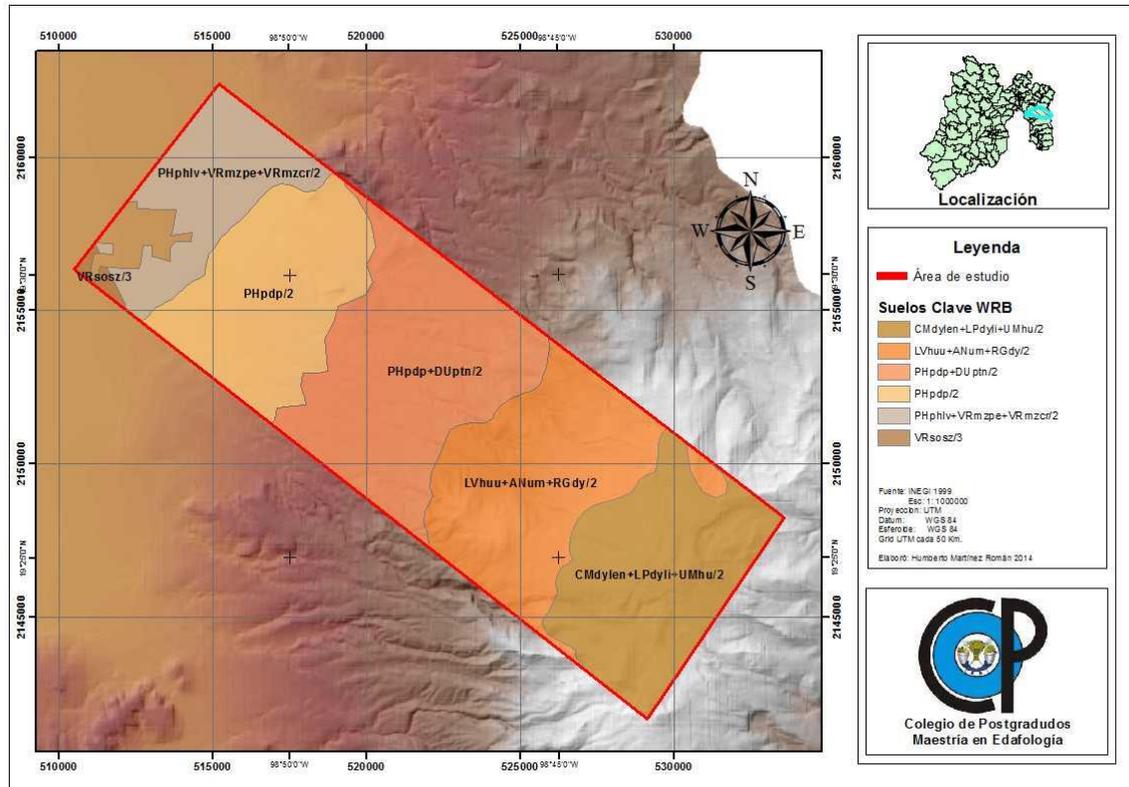


Figura 25. Tipos de Suelos.

5.2 Adquisición de datos

EROS-A1 y B1 son los miembros de la constelación y que se sincronizan con el sol en órbita polar de la compañía internacional ImageSat que fueron equipados con detectores de dispositivo de carga acoplada (CCD) y / tiempo de integración y retraso (TDI) y detectores CCD, respectivamente. EROS-A1 fue colocado en la altitud de 480 Km y el EROS-B1 recoge los datos de altitud entre 400 a 600 km. El momento mismo de revisita 1.8 días ofrece la oportunidad de

utilizar las dos imágenes de satélite para el área de interés. Las especificaciones de EROS A1 y el método para ortorectificar las imágenes fueron discutidos por Westin y Farsgern (2001).

Las imágenes utilizadas en este trabajo fueron adquiridos por el satélite EROS-B (Figura 26) un satélite comercial de imágenes de alta resolución. El lanzamiento de EROS-B se llevó a cabo el 25 de abril de 2006, sobre el lanzamiento de un vehículo Start-1 desde el Cosmódromo Svobodni en el este de Siberia. Ligeramente más grande y de apariencia similar a EROS-A, (Baiocchi *et al.*, 2005) el satélite tiene capacidades superiores, incluyendo una cámara más grande de tipo CCD / TDI (Charge Coupled Device / Time Delay Integration), con una resolución pancromática estándar de 0,70 m, a una altitud de alrededor de 500 kilómetros, mejoró la precisión del apuntado y un enlace de comunicación de datos más rápida.

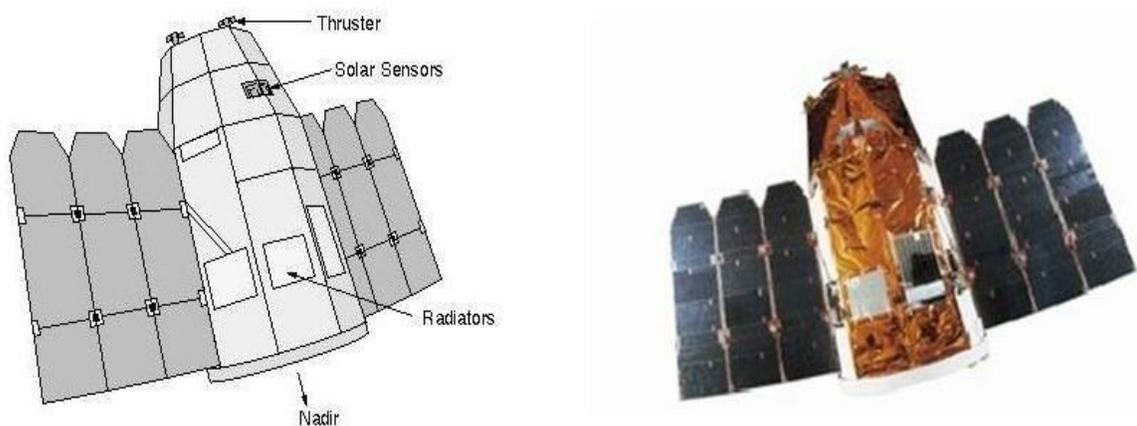


Figura 26. Satélite EROS-B1

Se utilizaron los siguientes datos y se procesan para generar un MDE:

- Imágenes EROS-B1 estéreo pares de imágenes que fueron adquiridos el 20 de enero del 2014. La Tabla 1 muestra las propiedades de las imágenes estéreo pares seleccionados. La razón detrás de usar imágenes EROS-B1 es la disponibilidad, el costo y tiempo de adquisición de imágenes
- Se llevó a cabo mediciones de campo con una unidad de GPS diferencial, las cuales se utilizaron para la obtención y optimización de los Puntos de Control Terrestre (CGP).
- Tiempo real estático datos de la encuesta que dio posiciones casi absolutos (sub-métricos exactitud de la posición). Estos puntos se utilizaron como GCP para mejorar la exactitud de X, Y, Z y las posiciones del MDE generado.

Cuadro 3. Características de las imágenes estereoscópicas EROS-B para la obtención del MDE

EROS-B	LEFT IMAGE	RIGHT IMAGE
1A-MBT1-e2_42934	1A-MBT1-e2_42934b	1A-MBT1-e2_42934c
Satellite	EROS-B1	EROS-B1
Camara	NA50	NA50
Sun elevation	46.16	46.10
Sun azimuth	206.87	207.05
Acquisition Date	20/01/2014	20/01/2014
Acquisition Time	20:03:53 utc	20:04:29 utc

El proceso de generación de un MDE es bastante complejo y requiere una mayor precisión en el uso de datos de entrada. El modelo de marco conceptual de

la metodología utilizada en la generación del MDE a partir de imágenes de satélite estereoscópicas se muestra en la figura 27.

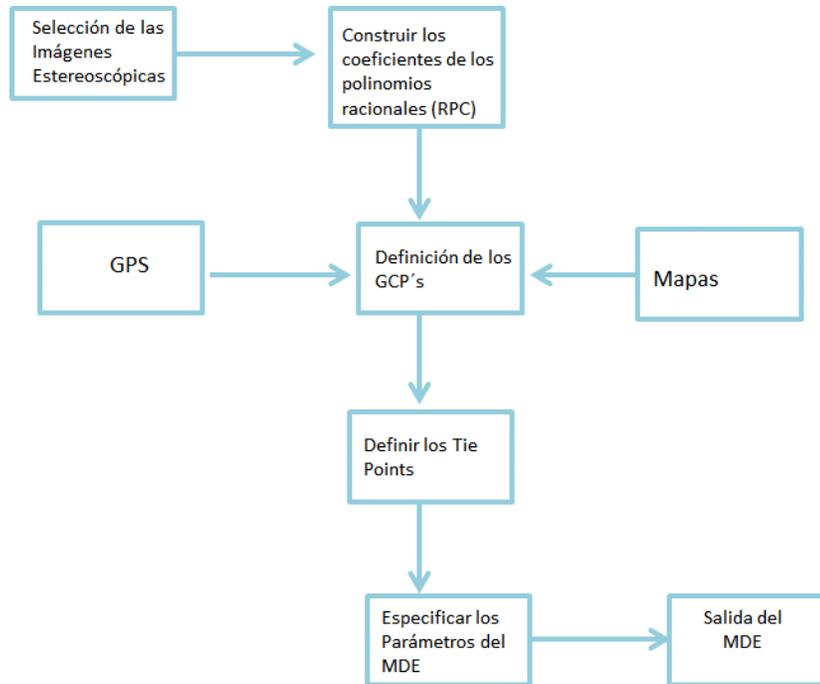


Figura 27. Modelo Marco conceptual de la metodología utilizada para la extracción del MDE

5.3 Software

Para la extracción del MDE de EROS-B, se utilizó el software comercial: PCI Geomática Version 2013 y Version 2014. Las imágenes se orientaron en PCI Geomática utilizando un conjunto de GCP (puntos de control).

En particular los datos previamente adquiridos por levantamiento estático DGPS. Para estudiar la precisión obtenida a partir del modelo y la exactitud de las imágenes, se hicieron algunas series de imágenes observando la orientación RMSE de GCP y TPs (Toutin, 2004a; Toutin, 2004b).

5.4 Levantamiento terrestre mediante GPS de alta precisión

El levantamiento de información de campo mediante el uso de Sistema de Posicionamiento Global (GPS), desempeña un papel importante en la precisión que se desea obtener en el Modelo Digital de Elevación; Cuando se requiere realizar el posicionamiento de puntos con la tecnología GPS es necesario seleccionar el método a ser utilizado considerando la precisión que se desea obtener y así como las características del equipo disponible para tal fin. Se hace entonces necesario que el usuario de estas tecnologías sea conocedor de las distintas fuentes de error que afectan a este tipo de mediciones de manera que el método seleccionado permita la cancelación o minimización de esos errores; el método Estático Diferencial para el posicionamiento preciso de puntos es un método que ofrece esa ventaja al usuario cuando se requiere posicionar puntos de manera precisa. El postproceso, etapa en la que mediante la utilización del software apropiado, se realiza un nuevo cálculo de los datos brutos almacenados en las unidades de memoria de cada receptor, debe ser entendido por los usuarios para poder ejecutar el manejo instrumental del software así como la correcta interpretación de los resultados (Pachas 2010). El equipo GPS empleado para la realización del levantamiento de campo es un equipo ProMark 3, las características de este equipo se describen en la tabla 2, figura 28.

Cuadro 4. Especificaciones GPS ProMark 3.

Parámetro	Especificación
Modo de levantamiento GPS admitido	Estático, Stop & Go, Cinemático
Precisión del levantamiento (RMS) - Estático	Horizontal: 0,005m + 1 ppm Vertical: 0,010m + 2 ppm
Precisión del levantamiento (RMS) – Stop & Go	Horizontal: 0,012m + 2,5 ppm Vertical: 0,015m + 2,5 ppm
Rendimiento en tiempo real	SBAS (WAAS/EGNOS) RMS: Horizontal < 1 metro (3 pies) DGPS (Baliza o RTCM) RMS: Horizontal < 1 metro (3 pies)
Espaciado entre puntos de levantamiento - Estático (longitud del vector)	Hasta 20 kilómetros
Espaciado entre puntos de levantamiento – Stop & Go (longitud del vector)	Hasta 10 kilómetros
Tiempo de observación – Estático	Normalmente de 4 a 40 minutos, según la longitud del vector
Tiempo de observación – Stop & Go	Normalmente 15 segundos
Tiempo de inicialización – Stop & Go	15 segundos en puntos conocidos 5 minutos en barra inicializadora
Canales satelitales GPS	12
Canales satelitales SBAS	2
Máscara de elevación de satélites GPS	10 grados
Intervalo de grabación	1 – 30 segundos
Intervalo de temperatura operativa	-10 a +60 grados C
Tipo de pila	ión litio 3,7 V, 3.900 mAh
Duración de las pilas	8 horas (funcionamiento normal)
Capacidad de memoria de almacenamiento de datos	128 MB SDRAM, 128 MB memoria Flash NAND Tarjeta SD extraíble: hasta 1 GB



Figura 28. GPS ProMark 3.

Previo a la realización del levantamiento de campo, se realizaron algunas pruebas de precisión y de calibración del equipo en los campos dentro del colegio de Postgraduados, con la finalidad de garantizar un levantamiento de tipo

submétrico, necesario para el procesamiento de las imágenes de satélite y la elaboración del Modelo Digital de Elevación, algunos de estos parámetros como el tiempo de recepción de satélites, formato de proyección, Datum, Esferoide, y algunos parámetros más del propio equipo.

La selección y la distribución de los puntos levantados se planearon previamente desde gabinete y basados en la imagen de satélite EROS-B de la zona de estudio, la elección se realizó con la finalidad de obtener los puntos lo mejor distribuidos, claramente visibles sobre la imagen de satélite y lo más factible de acceder. Se programaron e identificaron 16 puntos a ser levantados cuya distribución se muestra en la figura 29.

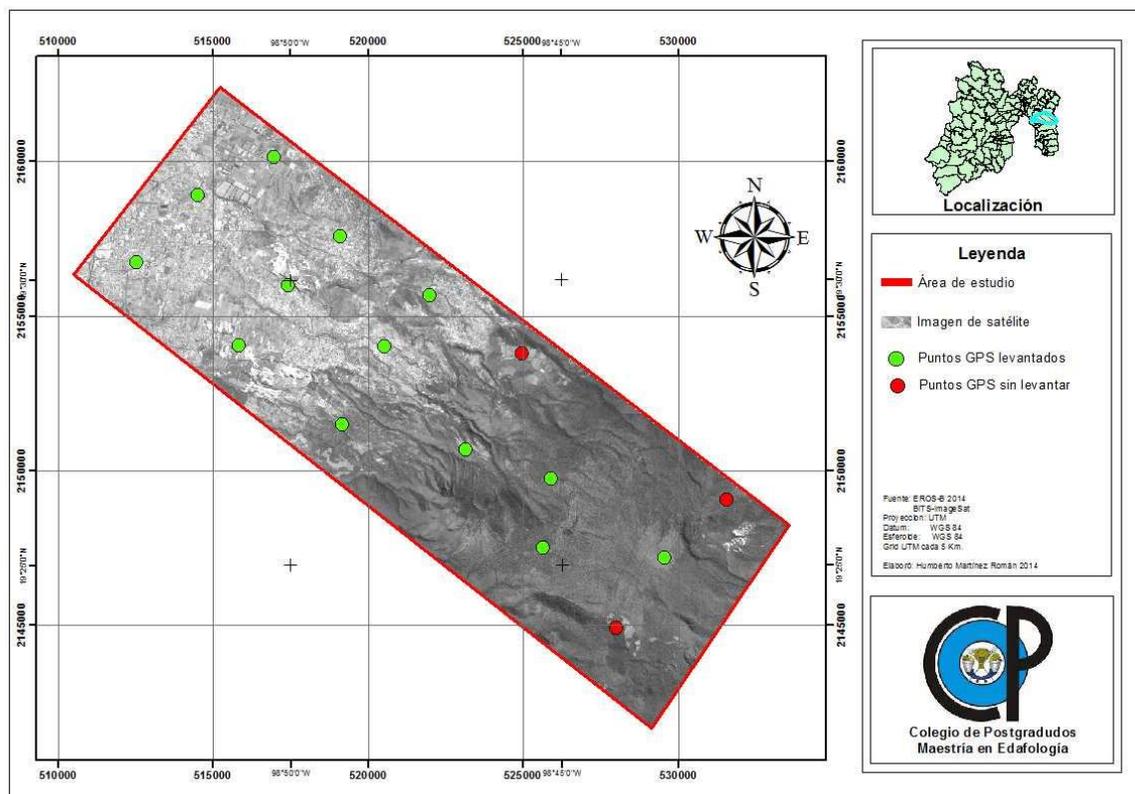


Figura 29. Levantamiento de puntos GPS programados.

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se lograron levantar 13 de los 16 puntos GPS programados, debido principalmente a cuestiones de tipo sociocultural, los cuales fueron descargados del equipo GPS como se muestra en el cuadro 3.

Cuadro 5. Puntos levantados y descargados del equipo GPS.

NOMBRE	FECHA	HORA	TIPO	TAMAÑO
RCP01A14.069	10/03/2014	09:28 a.m.	Archivo 069	525 KB
RCP01B14.069	10/03/2014	11:34 a.m.	Archivo 069	550 KB
RCP01C14.069	10/03/2014	01:02 p.m.	Archivo 069	353 KB
RCP01D14.069	10/03/2014	02:41 p.m.	Archivo 069	252 KB
RCP01E14.069	10/03/2014	04:27 p.m.	Archivo 069	452 KB
RCP01A14.076	17/03/2014	10:21 a.m.	Archivo 076	487 KB
RCP01B14.076	17/03/2014	02:03 p.m.	Archivo 076	454 KB
RCP01C14.076	17/03/2014	03:31 p.m.	Archivo 076	247 KB
RCP01A14.079	20/03/2014	10:42 a.m.	Archivo 079	562 KB
RCP01B14.079	20/03/2014	03:30 p.m.	Archivo 079	424 KB
RCP01A14.091	01/04/2014	01:37 p.m.	Archivo 091	567 KB
RCP01B14.091	01/04/2014	04:03 p.m.	Archivo 091	405 KB
RCP01A14.092	02/04/2014	12:46 p.m.	Archivo 092	471 KB
RCP01B14.092	02/04/2014	04:15 p.m.	Archivo 092	413 KB

Para la realización del proceso de corrección diferencial de estos puntos, empleamos los datos de la Red Geodésica Nacional Activa (RGNA) del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), de 4 estaciones: Puebla, Puebla; Tampico, Tamaulipas; Toluca, Edo. México; Querétaro, Querétaro, como lo muestra el cuadro 4 y figura 30.

La descarga de los archivos con extensión RINEX empleados fueron aquellos en los que coincidía el mismo día y hora de cada uno de los puntos levantados, los cuales fueron unidos mediante el software UNERINEX y corregidos diferencialmente con el software GNSS Solutions.

Cuadro 6. Coordenadas Geodésicas de las Estaciones de la RGNA empleadas para la corrección diferencial de los puntos levantados mediante GPS (ITRF2008, ÉPOCA 2010.0).

Nombre de la Estación	Latitud Norte	Longitud Oeste	Altura Geodésica(m)	Altura vertical de la Antena (m)	Receptor	Antena según fabricante	Antena según National Geodetic Survey	Archivo LOG
ICEP	19 01 58.88475	98 11 15.35143	2150.327	0.214	Z-Xtreme	L1/L2 Geodetic	ASH 700228 D	icep_20131120.log
TAMP	22 16 41.95540	97 51 50.49882	21.05	0.148	5700	Zephyr Geodetic	TRM 41249.00	tamp_20040901.log
TOL2	19 17 35.64347	99 38 36.50048	2651.73	0.148	5700	Zephyr Geodetic	TRM 41249.00	tol2_20040901.log
UQRO	20 35 28.09773	100 24 45.69377	1817.973	0.177	ZXII	L1/L2 Geodetic	ASH 700228 D	uqro_20141107.log

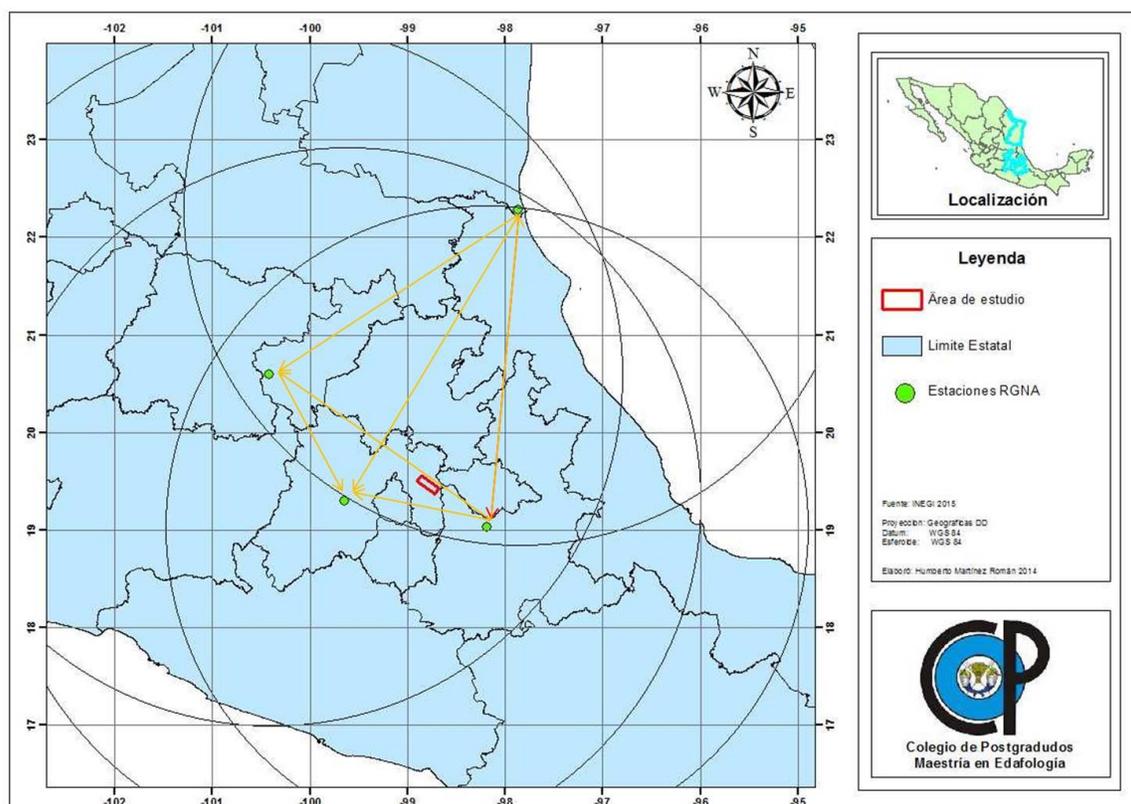


Figura 30. Localización de las estaciones de la RGNA empleadas para el proceso de Corrección Diferencial del levantamiento GPS.

El resultado de los puntos GPS con corrección diferencial los podemos observar en el cuadro 5 y figura 31.

Cuadro 7. Puntos GPS levantados con corrección diferencial, donde obtenemos los datos de Longitud (X), Latitud (Y) y Altura (Z).

Punto ID	X	Y	LONGITUD	LATITUD	Altura MSNM
1	512505.001	2156780.496	98° 52' 50.96278"W	19° 30' 20.27868"N	2246.021
2	514506.079	2158921.006	98° 51' 42.24823"W	19° 31' 29.86865"N	2258.833
3	516973.662	2160175.343	98° 50' 17.53684"W	19° 32' 10.60657"N	2270.940
4	519149.199	2157557.419	98° 49' 02.97767"W	19° 30' 45.36484"N	2379.889
5	517454.760	2155974.832	98° 50' 01.16751"W	19° 29' 53.93345"N	2377.861
6	515881.768	2154037.951	98° 50' 55.19164"W	19° 28' 50.96667"N	2351.283
7	519295.417	2151435.041	98° 48' 58.18569"W	19° 27' 26.17568"N	2541.788
8	520615.120	2153956.236	98° 48' 12.82250"W	19° 28' 48.15230"N	2494.707
9	522112.680	2155575.139	98° 47' 21.38259"W	19° 29' 40.76353"N	2595.021
11	523394.278	2150444.206	98° 46' 37.64341"W	19° 26' 53.78237"N	2940.954
13	526044.095	2147081.851	98° 45' 06.92901"W	19° 25' 04.27412"N	3490.163
12	526294.396	2149351.882	98° 44' 58.23289"W	19° 26' 18.11516"N	3363.144
15	530158.666	2146478.412	98° 42' 45.87309"W	19° 24' 44.43406"N	4128.660

6.1 Extracción del MDE

Para la elaboración del Modelo Digital de Elevación se utilizó el modelo matemático de Toutin's, esta propuesta de cálculo, es una relación matemática utilizada para correlacionar los píxeles de una imagen para corregir ubicaciones sobre el terreno que representan las distorsiones conocidas. Diferentes sensores requieren diferentes modelos matemáticos para corregir las distorsiones (Geomatica, 2014).

Se capturaron los 13 Ground Control Points (GCP) levantados mediante la metodología de GPS Diferencial, se agregaron posteriormente de manera automática **269 tie points** (Figura 31).

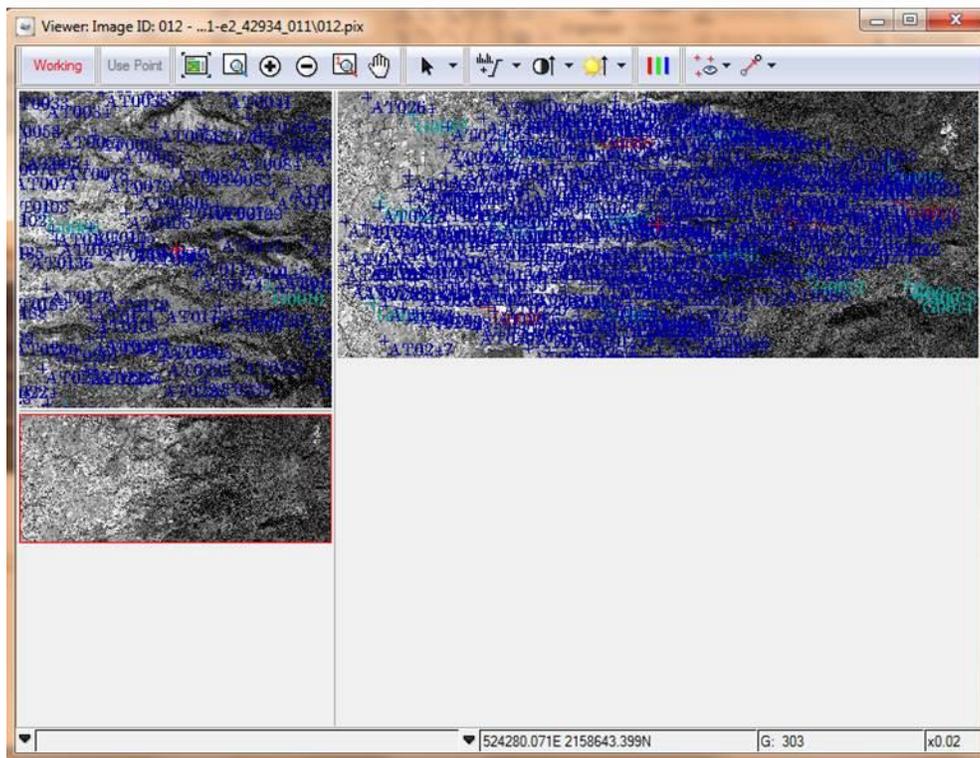
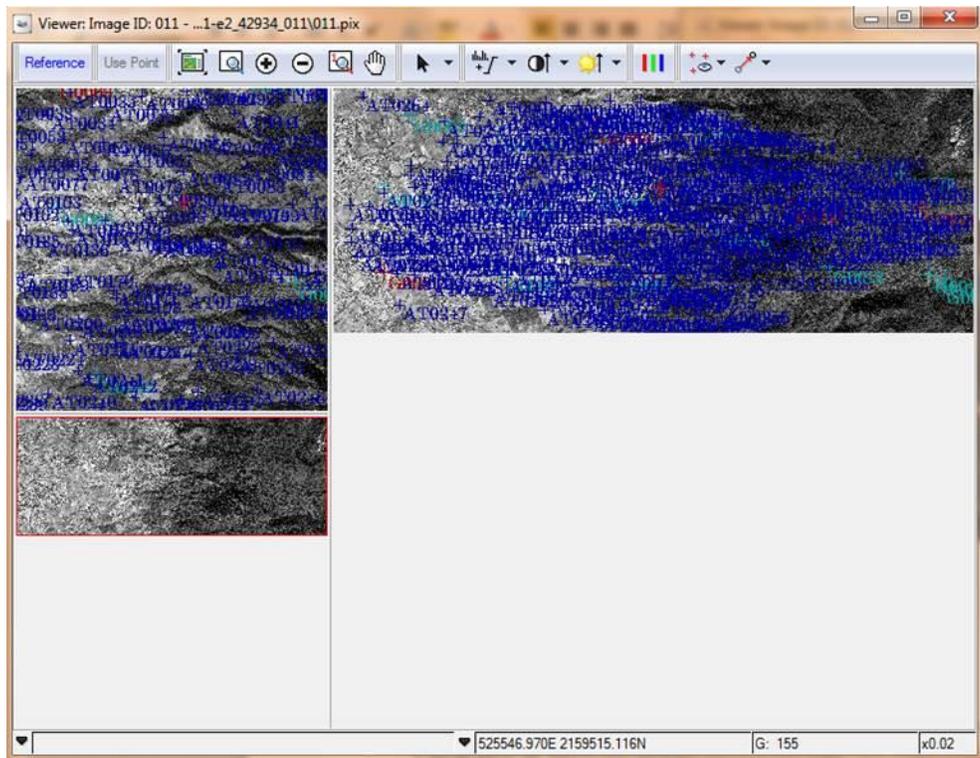


Figura 31. Captura sobre las imágenes estereoscópicas EROS-B de los 13 GCP DGPS y 269 TiePoints.

Estos puntos de control arrojaron valores de RMS (Root Mean Square o raíz cuadrada media, por su nombre en inglés) de casi 100 pixeles, lo cual se considera un error muy alto, para esto se eliminaron los puntos con mayor contribución de error, hasta llegar a un RMS de 5 pixeles como lo muestra la figura 32, lo cual no es lo suficientemente muy bueno debido a que lo ideal por el tipo de sensor y por la resolución espacial (70 centímetros) aspiramos a que fuera 1 a 2 pixeles de RMS, pero nos permitió generar la epipolaridad.

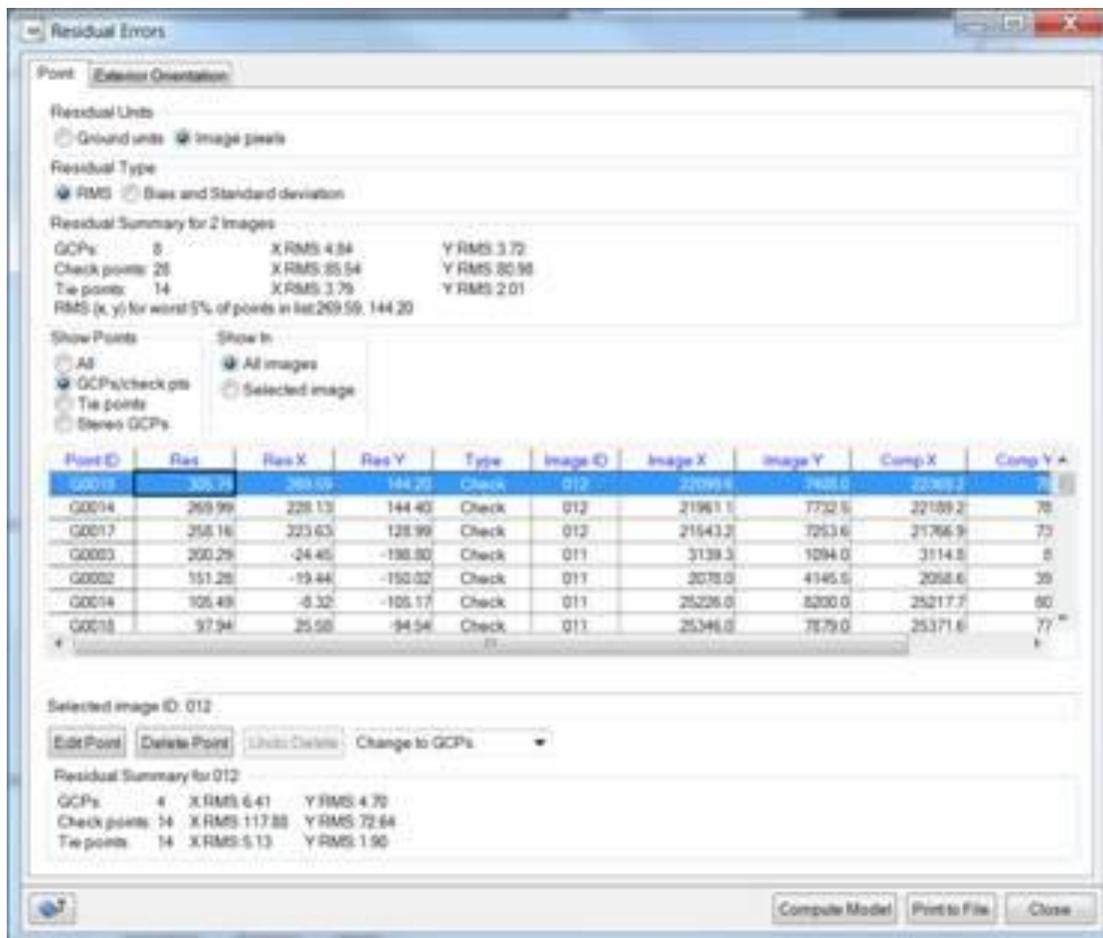


Figura 32. RMS final para la generación de las imágenes epipolares.

Utilizando los *Ground Control Points* y *TiePoints*, el programa PCI Geomatica calcula la geometría epipolar y las imágenes epipolares que serán empleadas para la extracción del MDE. Las imágenes epipolares son estereopares en cual la imagen izquierda y la imagen derecha están orientadas de tal manera que los GCP tienen las mismas coordenadas en ambas imágenes. El uso de imágenes epipolar elimina una dimensión de la variabilidad, lo que aumenta considerablemente la velocidad de procesamiento de imágenes de coincidencia, así como la fiabilidad de los resultados coincidentes (Geomatica 2014).

La extracción del MDE y los parámetros establecidos se muestran en la figura 33, dándonos como resultado un Modelo Digital de Elevación de 1,5 metros de resolución espacial como lo muestra la figura 34.

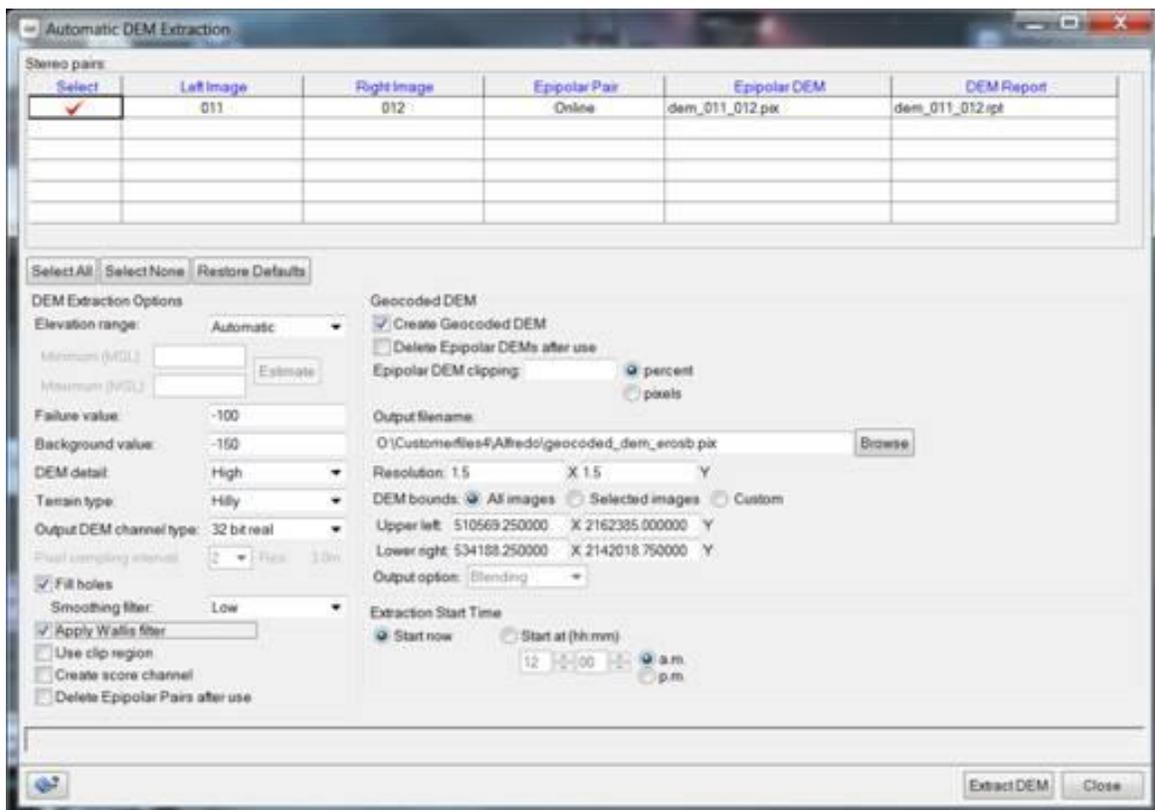


Figura 33. Parámetros finales para la extracción del MDE.

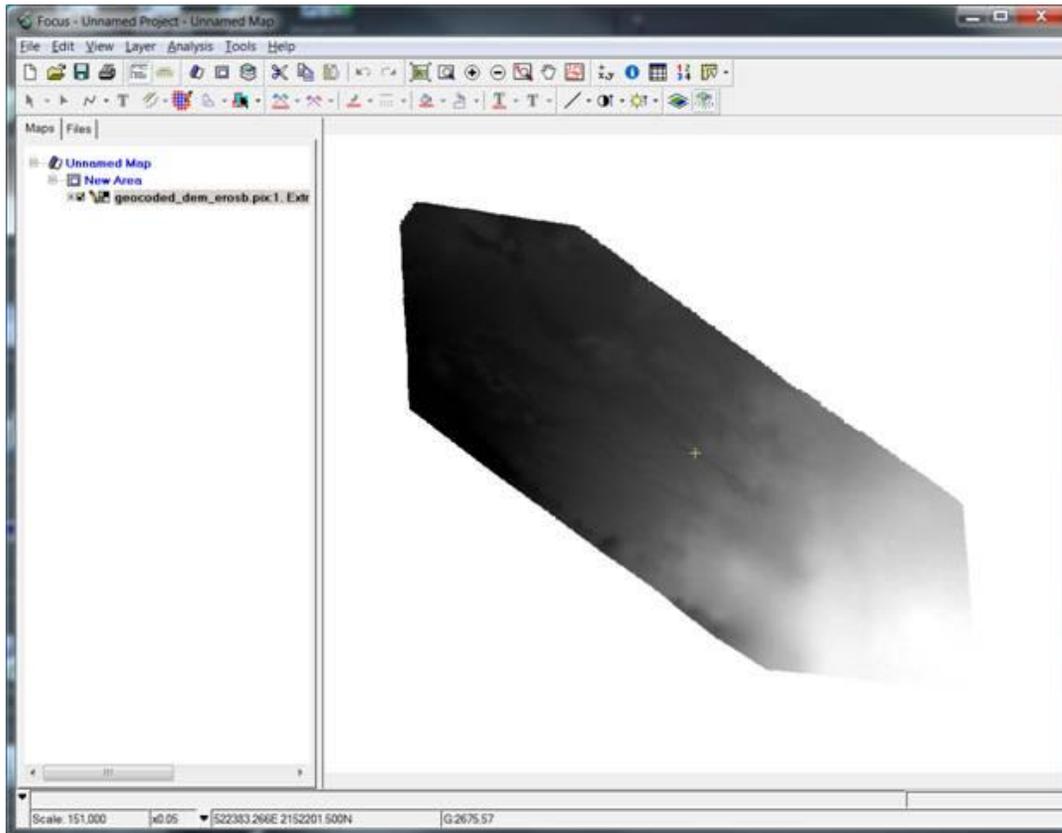


Figura 34. MDE con resolución espacial de 1.5 metros usando imágenes EROS-B.

Con la finalidad de realizar el comparativo en cuanto a la precisión del MDE obtenido con las imágenes de satélite EROS-B, se utilizaron los datos obtenidos del levantamiento DGPS, así como el Modelo Digital de Elevaciones de INEGI con resolución espacial de 15 metros; para extraer los valores de Z del MDE del INEGI y de EROS-B nos basamos en los valores de X e Y del levantamiento DGPS y para esto empleamos el software ArcGIS con un script en lenguaje Python, el cuadro 6 nos muestra los valores de X, Y y Z obtenidos tanto del MDE del INEGI con resolución espacial de 15 metros y del MDE obtenido con las imágenes de satélite EROS-B con resolución espacial de 1.5 metros.

Cuadro 8. Cuadro comparativo de valores X, Y y Z de los MDE EROS-B e INEGI y los datos obtenidos mediante levantamiento DGPS

GCP	LEVANTAMIENTO DGPS			DEM EROS-B			DEM INEGI 15 METROS		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
1	512505.00	2156780.49	2246.02	ND	ND	0.00	512204.99	2156780.55	2248.00
2	514506.08	2158921.01	2258.83	514506.26	2158719.36	2389.22	514505.90	2158921.57	2265.00
3	516973.66	2160175.34	2379.88	ND	ND	0.00	516972.78	2160176.66	2274.00
4	519149.20	2157557.42	2379.89	519135.18	2157474.19	2431.02	519147.94	2157559.20	2377.00
5	517454.76	2155974.83	2377.86	517435.02	2155974.36	2365.85	517453.74	2155975.72	2370.00
6	515881.77	2154037.95	2351.28	515853.37	2154164.41	2255.67	515881.02	2154038.90	2350.00
7	519295.42	2151435.04	2541.79	519270.87	2151593.99	2523.85	519295.70	2151435.87	2539.00
8	520615.12	2153956.24	2494.71	520596.08	2154025.97	2496.54	520615.50	2153957.03	2472.00
9	522112.68	2155575.14	2595.02	522100.39	2155561.98	2577.01	522112.01	2155576.46	2582.00
11	523394.28	2150444.21	2940.95	523377.31	2150521.78	2959.68	523393.42	2150444.95	2934.00
12	526294.40	2149351.88	3363.14	526293.40	2149378.94	3368.55	526293.31	2149352.90	3358.00
13	526044.10	2147081.85	3490.16	526055.18	2147107.88	3624.37	526043.21	2147082.95	3496.00
15	530158.67	2146478.41	4128.66	530138.08	2146464.34	4049.40	530158.67	2146478.58	4124.00

Para comparar la precisión del MDE de EROS-B y del MDE del INEGI a 15 metros se realizó en el lenguaje de Estadística R, el paquete de programación se obtuvo del sitio de CRAN: <http://www.r-project.org/>. La estrategia de análisis se basó en comprar la información de los puntos DGPS de muestreo, el MDE del INEGI a 15 metros y el MDE de EROS-B, para lo cual, una vez obtenido una matriz de puntos de cada raster, se procedería a tratarlos en algún modelo de regresión para asegurar la exactitud que ofrece la metodología propuesta, utilizando imágenes estereoscópicas EROS-B.

Las altitudes de los *raster* se extrajeron mediante la biblioteca *raster* y el comando *extract*, este comando extrae al paso de un vector (archivo shp) y se obtiene una matriz de valores de cada pixel, cada renglón representa un pixel y cada columna una capa, en la figura 35 se muestra el código de lenguaje R empleado así como los raster de los MDE del INEGI y de EROS-B en el software R.

```

library(mapproj)
library(raster)
CAMPO <-
readShapePoints("c:\\data\\TLALOC_UTM_CORDIF.shp")
print(proj4string(CAMPO))
proj4string(CAMPO) <- "+proj=utm +zone=14+north
+ellps=WGS84 +datum=WGS84"
inegi = raster("c:\\data\\inegi1.tif")
DEM_1 = inegi
plot(DEM_1)
plot(CAMPO, add = TRUE, axes=TRUE, border="gray")
sp <- SpatialPoints(CAMPO)
z <- extract(DEM_1,sp, method='bilinear')
for (i in 1:length(z)) { s[z[[i]]] <- i }
plot(s)
head(z)
plot(z ~ elevation, estaciones)
+ xlim = c(500000, 540000),
+ ylim = c(2140000, 2165000),
+ xlab = "Elevación de estación muestreada (m)",
+ ylab = "Elevación de Inegi (m)"

```

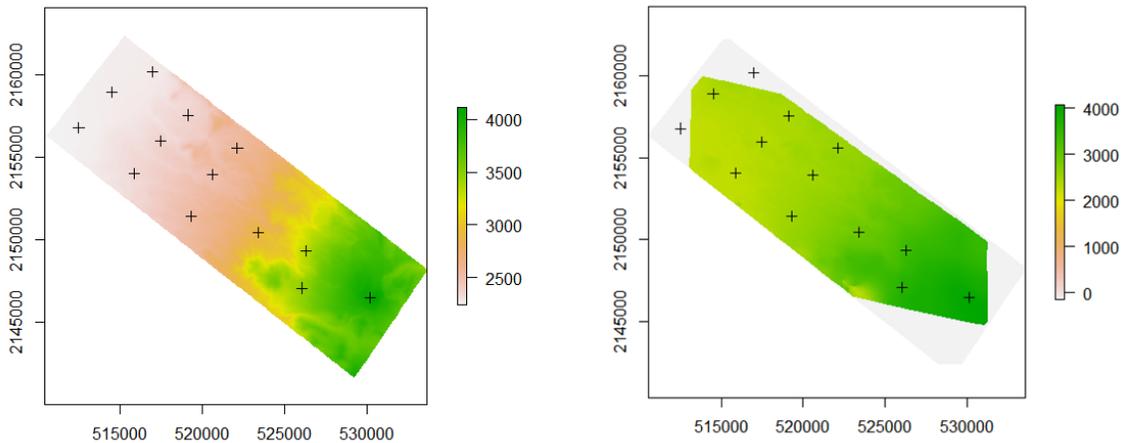


Figura 35. Código de lenguaje R empleado, y la representación raster en R de los MDE del INEGI y EROS-B.

Posteriormente se procedió a comparar los puntos del levantamiento DGPS contra cada matriz de datos originados en los raster, el código empleado para este proceso se muestra en la figura 36.

```

library(ggplot2)
library(gplots)

dat = read.csv("C:\\data\\adata.csv",
header=T,sep=",")
ggplot(dat, aes(x=Altura_E, y=Altura_C)) +
geom_point(shape=1) +
geom_smooth(method=lm)

```

Figura 36. Código de lenguaje R empleado.

Posteriormente se hizo el análisis de regresión de la matriz de los datos raster y los resultados los muestra la figura 37.

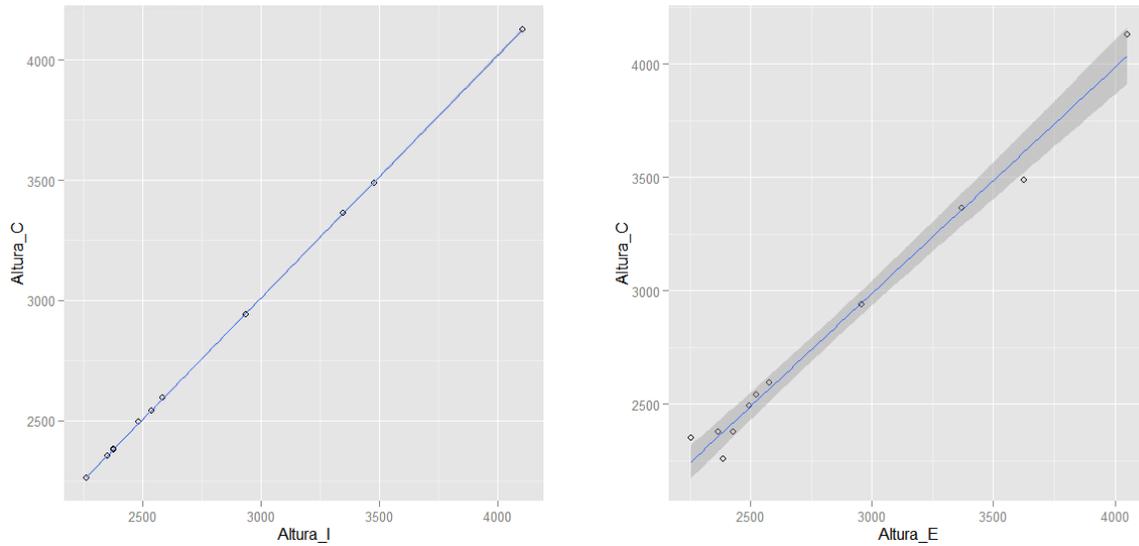


Figura 37. Regresión de la matriz de los raster, donde Altura_I corresponde a Alturas INEGI y Alturas_E a Alturas EROS-B.

Cuando se compraran ambos raster con dos rangos de confianza se tienen los modelos que se muestran en la figura 38.

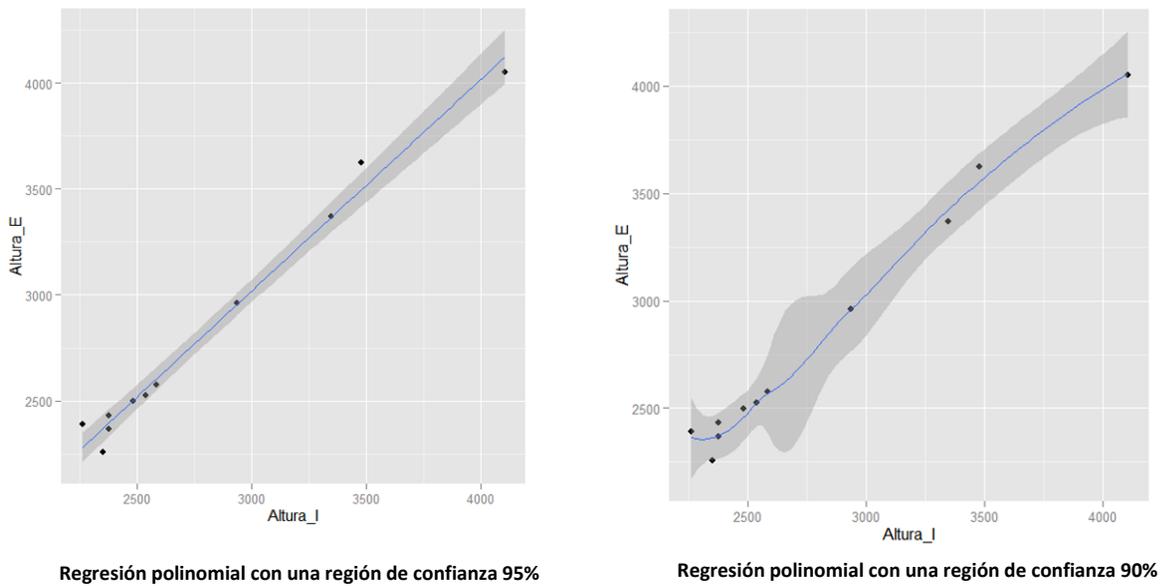


Figura 38. MDE EROS-B vs MDE NEGI 15 m., con dos regiones de confianza

El modelo de regresión, que se utiliza del lenguaje R, es una alternativa a la regresión tradicional llamada robusta, con el objeto que los valores atípicos (los producidos por el modelo de EROS-B), no se vean afectados por lo pequeño de la muestra y la distribución morfológica, de tal manera que es una aproximación en una distribución normal, con la necesidad de probar la hipótesis de una precisión convergente en la mediana:

Cuadro 9. Alturas normalizadas para el modelo experimental

	Altura DGPS normalizada	Altura INEGI normalizada	Altura EROS-B normalizada
Mínimo	-0.9169	-0.9093	-0.9448
1er Cuartil	-0.7176	-0.718	-0.6871
Mediana	-0.4471	-0.4424	-0.4974
Media	0	0	0
3er Cuartil	0.566	0.5663	0.571
Máximo	2.187	2.184	2.048

En cuadro 7, se aprecia la condición de una excelente predicción a lo largo del universo de puntos disponible, entre las variables de Campo (GPS) y aquellos que tiene EROS-B.

En la figura 39, 40, 41 y 42 podemos observar los raster de los MDE de EROS-B y del INEGI, así como el histograma de los datos estadísticos, así mismo si graficamos los puntos de control extraídos de cada modelo podemos observar que ambos muestran una tendencia en la distribución de valores altitudinales muy similar, con la distorsión y diferencias posicionales para el caso de EROS-B.

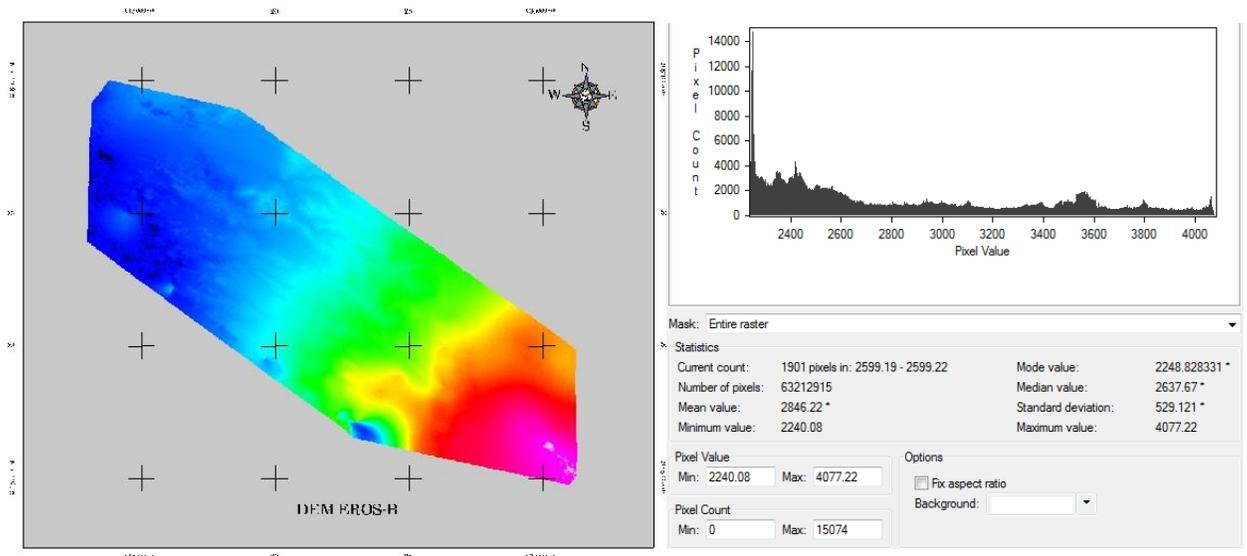


Figura 39. MDE EROS-B e Histograma de datos altitudinales.

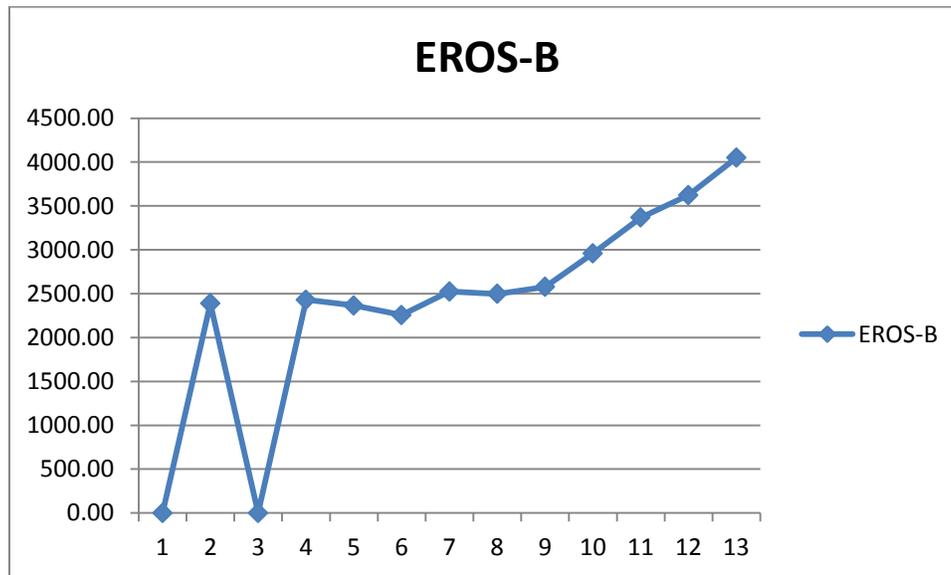


Figura 40. Grafica de tendencia de puntos DGPS del MDE EROS-B..

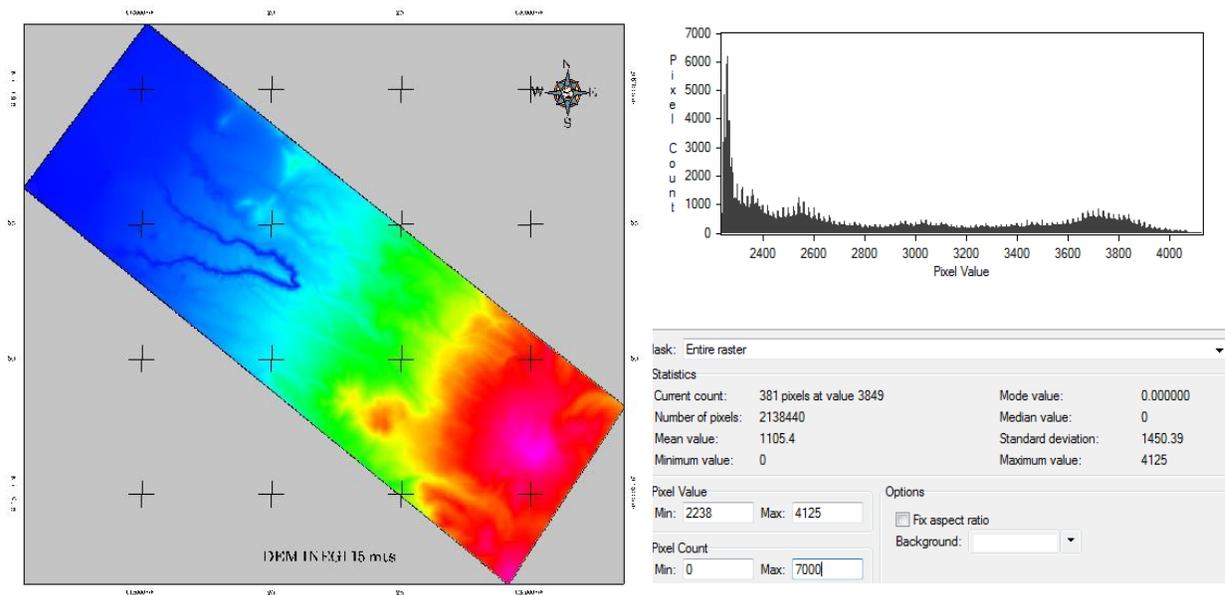


Figura 41. MDE INEGI e Histograma de datos altitudinales.

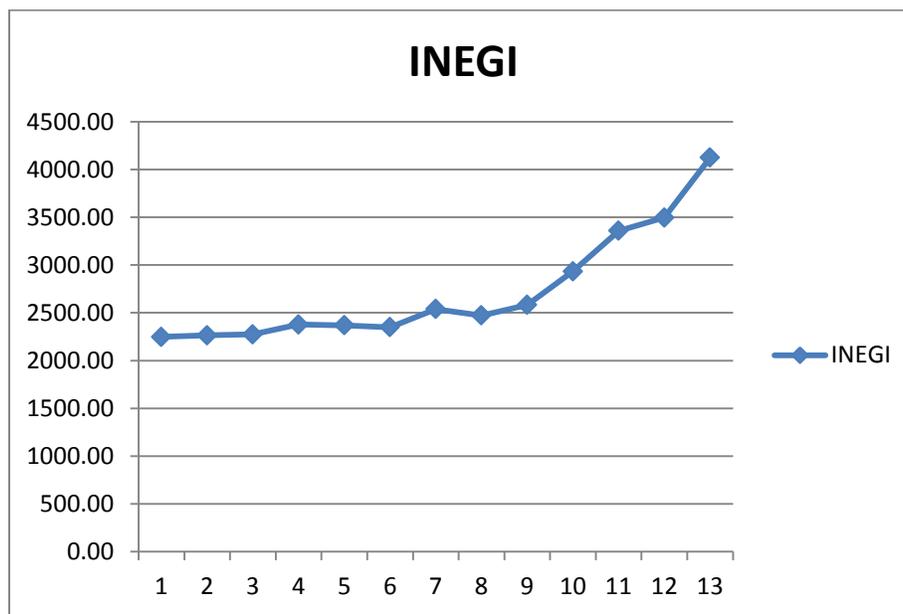
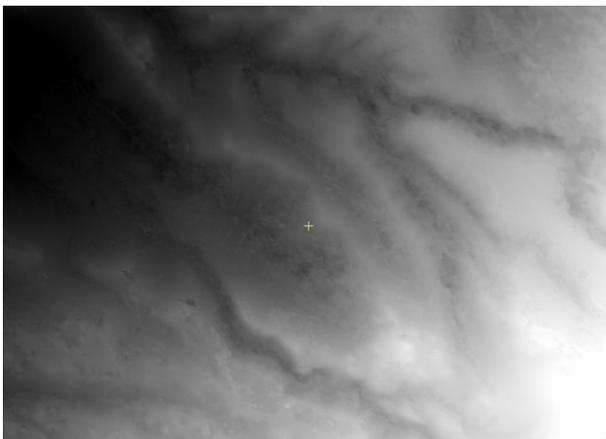


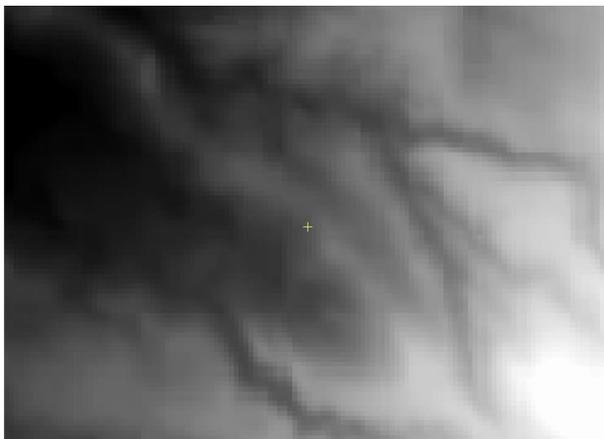
Figura 42. Grafica de tendencia de puntos DGPS del MDE INEGI.

Eso nos muestra que ambos modelos presentan rasgos geomorfológicos muy similares, esto lo podemos observar en la figura 42, se realizó un recorte de ambos MDE, EROS-B e INEGI, donde se puede observar tanto en el MDE como en el sombreado (Shaded Relief/ Hillshade) que ambos MDE presentan los

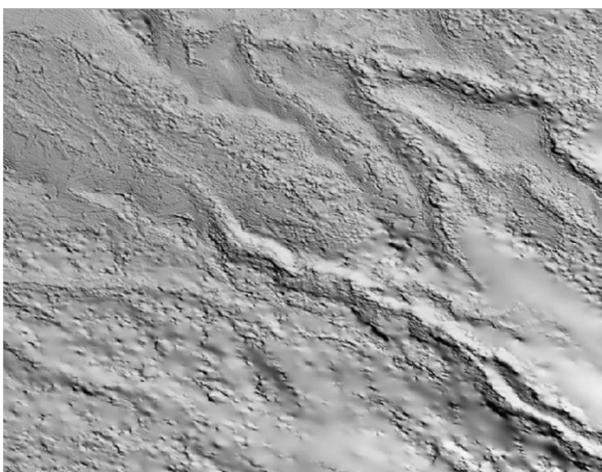
mismos accidentes geográficos, así mismo se puede apreciar el detalle de los rasgos dentro del MDE de EROS-B con resolución espacial de 1.5 metros.



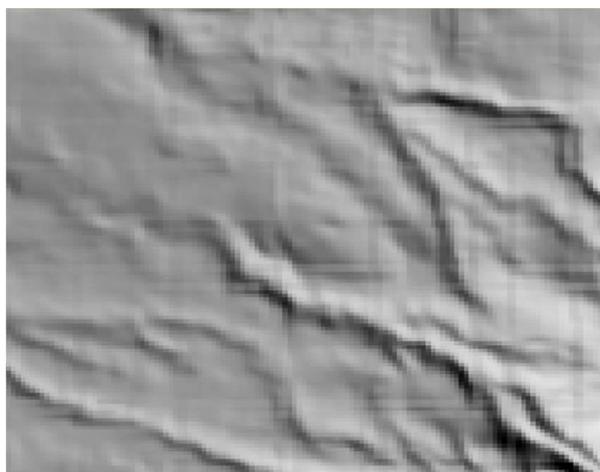
MDE 1.5 metros usando imágenes EROS-B



MDE 15 metros INEGI



Sombreado MDE 1.5 metros usando imágenes
EROS-B



Sombreado MDE 15 metros INEGI

Figura 43. Comparativo de los rasgos geomorfológicos entre el MDE EROS-B e INEGI.

7. CONCLUSIONES

Las imágenes de satélite de alta resolución en México, no se explotan de manera racional y maximizando la inversión, en parte porqué el personal técnico esta insuficientemente preparado y comprenden mal la información contenida en los sensores y siguen utilizando métodos que eran adecuados a fines del siglo XX.

Los MDE, están llamados a ser una parte integral del desarrollo de cartografía temática, lo mismo en temas del medio físico, así como en áreas de interés socioeconómico, su integración como parte del proceso de formación de información básica, temática y derivada, está fuera de discusión, pero con base a lo ya expuesto es un campo fértil para el desarrollo de productos académicos y comerciales, así como para la formación de expertos con un nuevo paradigma en la Geomática y en la Teledetección.

Las imágenes de EROS-B, son contenedores de información muy valiosa, cuyo precio es muy competitivo, pero su novedad y complejidad, los han alejado del proceso de trabajo académico y apenas son explotadas en el sector comercial del país. Este trabajo ha buscado demostrar, que con las herramientas adecuadas, se puede llegar hasta un nivel de alta precisión, en el proceso de modelado y evaluación de MDE para aplicaciones específicas, en donde la información pública disponible, no es suficiente o no es adecuada

El proceso de validación del MDE, mostró ser difícil de manejar, debido a que no se cuenta con antecedentes en la bibliografía o un trabajo de campo extensivo, que por ser demasiado costoso y prolongado, no era un alcance en este trabajo, así como el nulo acceso de datos de precisión como los generados por LIDAR, en México no se cuenta con MDE generados con LIDAR a nivel submetrico, existen muy pocas áreas y muy dispersas de la República Mexicana que son generados por empresas particulares para proyectos muy específicos. De esta forma se ha propuesto un proceso de validación empírico que ha mostrado ser suficiente, si se parte de un universo local, de los puntos, en donde los puntos GCP, han sido tratados como el conjunto de datos sin desviaciones, y los datos MDE de INEGI como testigos.

Respecto a la calidad de datos, en los distintos paisajes, este modelo mostro una mejor precisión en las partes centrales de la imagen, mientras que en las partes extremas bajas y altas la precisión descendió esto considerando la cantidad de puntos de control terrestres levantados, y principalmente a que sus datos orbitales de las imágenes de satélite EROS-B no son muy precisos para esta parte del mundo en la captura de las imágenes, por lo que existe la necesidad de contar con más puntos de control terrestres, que ayudarán a corregir las imágenes EROS-B.

8. RECOMENDACIONES

Este trabajo, puede servir como un antecedente, para que a partir de trabajos de campo extensivos, se pueda formar cartografía temática de mayor precisión en la modelación de suelos con base a propiedades como la altitud, pendiente exposición y rugosidad, la cual en la actualidad es muy costosa, para municipios y estados; los Modelos Digitales de muy alta precisión nos permitirán crear una mejor caracterización sobre pérdida de suelo a nivel predio, donde en función de la pendiente del terreno, el tipo y condición del suelo y las prácticas de manejo de los cultivos se estiman las pérdidas de erosión hídrica, así como ayudar en el mejor manejo de los suelos agrícolas del país y en un contexto sostenible del trinomio suelo-planta-agua.

Asimismo, ante la avalancha de nuevos satélites, con sensores más complejos y mayor resolución, este trabajo puede mostrar, como construir flujos de trabajo adecuados para estas nuevas tecnologías

9. LITERATURA CITADA

- Baltsavias, E. P., Gruen A., Küchler, M., Thee P., Waser L.T. and Zhang L. (2006).** Tree height measurements and tree growth estimation in a mire environment using digital surface models, Workshop on 3D Remote Sensing in Forestry, 14th . 15th Feb. 2006, Vienna . Session 2a.
- Burrough, P. A. (1986).** Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assessment, 194 pp., Oxford University Press, New York, NY.
- Band, L. and Moore, I. (1995).** Scale: Landscape Attributes And Geographical Information Systems, Hydrol. Processes, 9, 401–422.
- Bouillon A, Bernard M, Gigord P, Orsoni A, Rudowski V, Beaudoin A (2006).** SPOT-5 HRS geometric performances: Using block adjustment as a key issue to improve quality of DEM generation. ISPRS J Photogramm Remote Sensing 60(3):170–181
- Baiocchi, V., Crespi, M., De Vendictis, L., Mazzoni, A.(2005).** DSM Extraction from IKONOS and EROS A Stereo Im-agery: Metodology, Accuracy and Problems. *In*: Proc. of EARSeL Workshop 3D Remote Sensing, Porto
- Chuvieco Emilio (1996)** “Fundamentos de Teledetección Espacial”, 3ª Edición. Ediciones Rialp, Madrid.
- Chekalin, V. F., & Fomtchemko, M. M. (2000).** Comparative characteristics of DEM obtained from satellite images SPOT-5 and TK-350. Sovinform Sputnik, 47 Leningrad Sky Pri, 125167 Moscow, Russia.
- Clavet D, Lasserre M, Pouliot J (1993).** GPS control for 1:50,000-scale topographic mapping from satellite images. Photogramm Eng Remote Sensing 59 (1):107–171
- Dr. Francisco J, Perales., María José Abásolo, Ramon Mas Sansó, 2004,** Introducción a la Estereoscopia. Realidad virtual y realidad aumentada, Unitat de Grafics i Visio, Dep. Matemàtiques e Informàtica, UIB.
- Digital Globe** <http://www.digitalglobe.com>
- Deilami, K. and Hashim, M., (2011).** Very High Resolution Optical Satellites for DEM Generation: A Review. European Journal of Scientific Research, 49(4), pp. 542-554.
- El-hadi, T. (2011)** Topographical mapping at 1:50,000 scale from satellite imagery using CARTOSAT-1. *In*: Ruas, A. (Ed.) Advances in Cartography and GIScience, Vol. 2, Springer, Heidelberg, 321-332.

- Felicísimo A. M., (1999).** Modelos Digitales del Terreno; Introducción y aplicación en las ciencias ambientales.
- F. F. Sabins. (1996)** “Remote Sensing: Principles and Interpretation”. Freeman & Co., New York, NY, third edition,.
- Fernando Magdaleno Mass y Roberto Martínez Romero.** Aplicaciones de la Teledetección Laser (LIDAR) en la caracterización y gestión del medio fluvial.
- Gruen, A., Remondino, F. and Zhang, L. (2004).** The Bamiyan Valley: Landscape Modeling for Cultural Heritage Visualization and Documentation. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXVI-5/W1. International Workshop on Processing and Visualization using High Resolution Imagery, Pitsanulok, Thailand.
- Gopala Krishna B, Kartikeyan B, Iyer KV, Mitra R, Srivastava PK (1996).** Digital photogrammetric workstation for topographic map updating using IRS-1C stereo imagery. Int Arch Photogramm Remote Sensing 31(B4):481–485
- Gabet, L., Giraudon, G., Renouard, L. (1997).** Automatic generation of high resolution urban zone digital elevation models. ISPRS J. Photogramm. Remote Sens. 52(1), 33–47
- Henk J. Buiten and Jan G. P. W. Clevers (1993).** “Land Observation by Remote Sensing: Theory and Applications”, volume 3 of Current Topics in Remote Sensing. Gordon & Breach,.
- Heipke C., (1999).** "Overview of Image Matching Techniques", Proceedings of the OEEPE Workshop 'Automation in Digital Photogrammetric Production
- Heuvelink, G. B. M. (1998).** Error Propagation in Environmental Modeling with GIS, 127 pp., Taylor & Francis Ltd, London, England.
- Hirano A, Welch R, Lang H (2003).** Mapping from ASTER stereo image data: DEM validation and accuracy assessment. ISPRS J Photogramm Remote Sensing 57(5–6):356 370
- Hashimoto, T., (2000).** DEM generation from stereo AVNIR images. Adv. Space Res. 25(5), 931– 936
- Kienzle, S. (2004).** The effect of DEM raster resolution on first order, second order and compound terrain derivatives, Transactions in GIS, 8(1), 83-111.
- Kääb A (2002).** Monitoring high-mountains terrain deformation from air- and spaceborne optical data. ISPRS J Photogramm Remote Sensing 57(1–2):39–52

- Kääb A (2005).** Combination of SRTM3 and repeat ASTER data for deriving alpine glacier flow velocities in the Bhutan Himalaya. *Remote Sensing of Environment* 94:463–474
- Lira Jorge.(2003).** “La Percepcion Remota: Nuestros ojos desde el espacio”, 3ª Edición. Editorial: Fondo de Cultura Económica, México.
- Lee, H-Y., Kim, T., Park, W., & Lee, H. K. (2003).** Extraction of digital elevation models from satellite stereo images through stereo matching based on epipolarity and scene geometry. *Image and Vision Computing*, 21, 789-796.
- Li, Z., Zhu, Q., Gold, C. (2005).** *Digital Terrain Modelling: Principles and Methodology*, CRC Press, Boca Raton
- Lillesand, T.M., Kiefer, R.W., Chipman, J.W.(2004)** *Remote Sensing and Image Interpretation*. Wiley, New York
- Lowe, D.G. (2004):** Distinctive image features from scale-invariant keypoints. *Int. J. Comput. Vis.* 60(2), 91–110
- Martínez-Casanovas, J.A., 1999.** Modelos Digitales del Terreno: Estructura de datos y aplicaciones en análisis de formas del terreno y en Edafología. QUADERNS DEMACS Núm. 25, Departament de Medi Ambient i Ciències del Sol, Universitat de Lleida, Lleida.
- Mukherjee S., Mukhopadhyay A., Brardwaj A., Mondal A., Kundu S., and Hazra S (2012).**Digital Elevation Model Generation and Retrieval of Terrain Attributes using CARTOSAT-1 Stereo Data *International Journal of Science and Technology* Volume 2(5):265-271
- Maruyama H, Kojiroi R, Ohtsuka T, Shimoyama Y, Hara S, Masaharu H (1994).** Three-dimensional measurement by JERS-1 OPS stereo data. *Int Arch Photogramm Remote Sensing* 30(B4): 210–215
- NASA internet site 2015, <http://www.jpl.nasa.gov/news/news.php?release=2014-321>**
- Novak K. and Stephen L., (1992).** ”Integration of Digital Photogrammetry and Raster GIS”, *Proceedings, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Comm IV*, pp. 894-898. Washington D.C.
- Quinn, P., Beven, K., and Lamb, R. (1995).** The $\ln(a/\tan B)$ index: how to calculate it and how to use it 15 within the TOPMODEL framework, *Hydrol. Processes*, 9, 161–182
- Rodriguez, E., C.S. Morris, J.E. Belz, E.C. Chapin, J.M. Martin, W. Daffer, S. Hensley, (2005),** An assessment of the SRTM topographic

products, Technical Report JPL D-31639, Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, California.

Remote Sensing Environment. Volume 88, Issues 1-2 November 2003

Rabas, B., Eineder, M., Roth, A., Bamler, R.(2003). The shuttle radar topographic mission- a new class of digital elevation models acquired by spaceborne radar. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 57: 241-262.

Raggam J, Gutjahr K, Almer A (1997). MOMS-2P und RADARSAT: Neue Sensoren zur stereometrischen Geländemodellerstellung. Vermessung Geoinformatics, Heft 4/97:267–280

San José Albacete A., Gutiérrez Mauro F., Metodología para procesar datos LIDAR con ArcGis Desktop 10. Universidad Politécnica de Madrid.

Sistemas de Observación Estereoscópica. Artículo publicado en la revista Mapping nº 30 de mayo-junio 1996, revisado y con más imágenes. Jesús Sastre Domingo. Ingeniero Técnico en Topografía. Jefe de Sección de Documentación Geográfica. Instituto Geográfico Nacional. Ministerio Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente.

Shears, J.C and J.W. Allan (1996). “Softcopy Photogrammetry and its Uses in GIS”, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing.Vienna, Vol.XXXI. pp 70-73

Shuttle Radar Topography Mission (SRTM). <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>

Toutin, Th., R. Chénier e Y. Carbonneau. (2001). 3D geometric modelling of Ikonos GEO images. Proceedings Joint ISPRS Workshop. High Resolution Mapping from Space 2001. Hannover, Alemania.

Thierry Toutin, René Chénier_ and Yves Carbonneau. 3D GEOMETRIC MODELLING OF IKONOS GEO IMAGES. Natural Resources Canada, Canada Centre for Remote Sensing 588 Booth Street, Ottawa, Ontario, Canada, K1A 0Y7.

Thomas M. Lillesand and Ralph W. Kiefer (1994). “Remote Sensing and Image Interpretation”. John Wiley & Sons, New York, NY, third edition,.

Toutin T (2000) Elevation modeling from satellite data. *In:* Encyclopaedia of analytical chemistry, Meyers R (ed) Wiley, Chichester, UK, vol. 10, pp 8543–8572

Toutin, T., (2008). ASTER DEMs for geometric and geoscientific applications: a review. International Journal of Remote Sensing, 29 (7), pp. 1855–1875.

Toppe, R. (1987). Terrain models- a tool for natural hazard mapping. IAHS Publication 162, 629-638.

- Toutin T, (2002).** 3D topographic mapping with ASTER stereo data in rugged topography. *IEEE Trans Geosci Remote Sensing* 40(10):2241–2247
- Toutin T., Cheng P (2002).** Comparison of automated digital elevation model extraction results using along-track ASTER and across-track SPOT stereo images. *Opt Eng* 41(9):2102–2106
- Toutin T (2004).** Comparison of stereo-extracted DTM from different high-resolution sensors: SPOT-5, EROS-A, IKONOS-II, and QuickBird. *IEEE Trans Geosci Remote Sensing* 42(10): 2121–2129
- Toutin T (2006).** Generation of DSM from SPOT-5 in-track HRS and across-track HRG stereo data using spatiotriangulation and autocalibration. *ISPRS J Photogramm Remote Sensing* 60(3):170–181
- Toutin, T., 2004.** DTM generation from IKONOS In-Track stereo Images using 3D physical model, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* , v.70
- Toutin, T.,2004.** Geometric processing of remote sensing images: models, algorithms and methods (review paper). *International Journal of Remote Sensing*, v.25
- Wilson, J.P., Gallant, J.C. (2000)** Digital terrain analysis. *In:* Wilson, J.P., Gallant, J.C. (Eds.) *Terrain Analysis: Principles and Applications*, John Wiley & Sons, New York, 1-28.
- Weibel, R. & Heller, M. (1991)** *Digital Terrain Modelling Geographical Information Systems: Principles and Applications* John Wiley & sons.
- Wise, S. (1998).** The Effect of GIS Interpolation Errors on the Use of Digital Elevation Models in Geomorphology, *In:* *Landform Monitoring, Modeling and Analysis*, edited by: Lane, S. N., Richards, K. S., and Chandler, J. H., p. 300, John Wiley and Sons.
- Wolock, D. and Price, C. (1994).** Effects of digital elevation model map scale and data resolution on a topography-based watershed model, *Water Resour. Res.*, 30(11), 3041–3052.
- Westin T., Forsgren J., 2001.** Orthorectification of EROS A1 images. *IEEE/ISPRS joint workshop on remote sensing and data fusion over urban areas*, Rome, Nov. 8-9.
- Welch R, Jordan RT, Luvall JC (1990).** Geocoding and stereo display of tropical forest multisensor datasets. *Photogramm Eng Remote Sensing* 56(10):1389–1392
- Welch R, Lo CP (1977).** Height measurements from satellite images. *Photogramm Eng Remote Sensing* 43(10):1233–1241

Zhang, W. and Montgomery, D. (1994). Digital elevation model grid size, landscape representation and hydrologic simulations, *Water Resources Research*, 30(4), 1019–1028.