



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA CONSTRUCCIÓN

**CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO
AMBIENTE**

**TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIEROS GEÓGRAFOS Y DEL MEDIO AMBIENTE**

**TEMA: VALIDACIÓN DEL MÉTODO DE NIVELACIÓN GPS EN
EL ECUADOR CONTINENTAL, MEDIANTE EL ANÁLISIS DE
VARIACIÓN DE ONDULACIÓN GEOIDAL**

AUTORES:

ENRÍQUEZ HIDALGO, DENNYS ALEXANDER

CÁRDENAS MARTÍNEZ, SANTIAGO JOSÉ

DIRECTOR: MSC. LEIVA GONZÁLEZ, CÉSAR ALBERTO

SANGOLQUÍ

2019



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA CONSTRUCCIÓN

CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, “**VALIDACIÓN DEL MÉTODO DE NIVELACIÓN GPS EN EL ECUADOR CONTINENTAL, MEDIANTE EL ANÁLISIS DE VARIACIÓN DE ONDULACIÓN GEOIDAL**” fue realizado por los señores Enríquez Hidalgo, Dennys Alexander & Cárdenas Martínez, Santiago José, ha sido revisado en su totalidad y analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 25 de enero de 2019

Una firma manuscrita en tinta azul, que parece ser la del Sr. Leiva González, César Alberto. La firma está escrita sobre una línea horizontal punteada.

Ing. Leiva González, César Alberto. MSc

DIRECTOR



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA CONSTRUCCIÓN

CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, Enríquez Hidalgo, Dennys Alexander & Cárdenas Martínez, Santiago José, declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación **“VALIDACIÓN DEL MÉTODO DE NIVELACIÓN GPS EN EL ECUADOR CONTINENTAL, MEDIANTE EL ANÁLISIS DE VARIACIÓN DE ONDULACIÓN GEOIDAL”** es de nuestra autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Consecuentemente la totalidad del contenido de esta investigación es veraz y se alinea con los principios de ética.

Sangolquí, 25 de enero de 2019

Firma manuscrita en tinta azul de Dennys Alexander Enríquez Hidalgo.

.....
Enríquez Hidalgo, Dennys Alexander

Firma manuscrita en tinta azul de Santiago José Cárdenas Martínez.

.....
Cárdenas Martínez, Santiago José



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA CONSTRUCCIÓN

CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE

AUTORIZACIÓN

Nosotros, Enríquez Hidalgo, Dennys Alexander & Cárdenas Martínez, Santiago José, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE publicar el trabajo de titulación, “VALIDACIÓN DEL MÉTODO DE NIVELACIÓN GPS EN EL ECUADOR CONTINENTAL, MEDIANTE EL ANÁLISIS DE VARIACIÓN DE ONDULACIÓN GEOIDAL” en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra responsabilidad.

Sangolquí, 07 de febrero de 2019

Una firma manuscrita en tinta azul que parece decir "Dennys Alexander Enríquez Hidalgo".

Enríquez Hidalgo, Dennys Alexander

Una firma manuscrita en tinta azul que parece decir "Santiago José Cárdenas Martínez".

Cárdenas Martínez, Santiago José

DEDICATORIA

“Mi tesis la dedico con todo mi amor y cariño a mi madre, Nelly Martínez, por ser una persona maravillosa quien con sus orientaciones, motivación y recomendaciones me ayudó a convertirme en la persona que soy. A mi padre, Vicente Cárdenas, quien de manera incondicional me acompañó en este largo camino, este triunfo es para ustedes por creer en mi capacidad, a pesar de los momentos difíciles que hemos pasado siempre me han brindado su comprensión, confianza y amor. A mis hermanos, por ser fuente de motivación e inspiración para superarme cada día, por hacer que mi vida este llena de promesas que me dan la fuerza para continuar y vencer cada obstáculo viendo siempre adelante”.

-Santiago José-

“Vuelve la añoranza del recuerdo más furtivo que ha dejado mi paso por esta Carrera. Qué grato poder haber alcanzado este punto cúspide, o en palabras de geógrafos, alcanzar el zenit. Esto no creo que podría dedicarlo, porque siempre he pensado que estando solo no lo podría haber logrado. Creo que para una persona es imposible alcanzar un logro sin una compañía, sin alguien que te inspire, sin alguien que te motive a que un sacrificio valdrá la vida. Tal vez, lo que, si puedo hacer, es retribuir la dedicación que mi madre durante cada día de su vida ha entregado, la de mi hermano que tal vez únicamente con escucharlo puedo sentir orgullo y cada día tratar de ser mejor por él, mi papito y mamita, que sin duda alguna entregarían su vida por velar el bienestar nuestro, a mis ñaños que su guía ha sido fundamental y mis primos, la alegría del hogar. ¡La grandiosa manera en que esta carrera me ha enseñado que los mejores momentos de la vida aparecen sin buscarlos!, pero para conseguirlos hay que lucharlos. Dedico sí, este trabajo a todos los amigos que vienen en búsqueda de tan ansiado objetivo, para que tomen motivación y puedan superar lo que hemos realizado, siempre he creído que ustedes, amigos, son capaces de llegar mucho más lejos de lo que piensan, ¡Ánimo! Siempre ánimo y ñeque”.

-Dennys Alexander-

AGRADECIMIENTO

“A mis padres, por darme la vida, cuidarme, guiarme en cada uno de mis pasos, han sabido formarme con valores y hábitos, lo cual me ha ayudado a salir adelante en los momentos difíciles, por apoyarme en cada una de mis decisiones, por sus consejos y amor incondicional. Gracias por sus esfuerzos y consideraciones. A mis hermanos, por estar siempre junto a mí, ser mis amigos escuchándome y apoyándome en cada momento. A mi familia en general, por cada uno de sus consejos, por tener siempre una palabra de aliento, por llenarme de risas y momentos únicos. A mi novia, que me ha llenado de amor sincero y momentos valiosos, por estar conmigo en todo momento y no dejarme caer, por creer en mí siempre e impulsarme a ser perseverante y levantarme por más difícil que sea para conseguir mis sueños y metas. A mi compañero de Tesis, por su esfuerzo, dedicación y sobre todo por su amistad en cada etapa de este arduo camino que hemos recorrido. A mis grandes amigos, los cuales me enseñaron que la amistad es la esencia de la vida, quienes sin esperar nada a cambio compartieron su conocimiento, risas y tristezas, haciendo de esta una de las experiencias más especiales y, a todas aquellas personas que estuvieron presentes en cada una de las diferentes etapas de mi vida”.

- Santiago José -

“Irónico, ¿no?, durante toda la carrera siempre quise llegar hasta este momento de ya graduarme, y ahora que llegó, se me hace tan difícil poder salir. Más que una carrera o algunos años de estudio, ha sido mi vida. Sí, en realidad no entré a esta, tan distinguida carrera, por mi afinidad, pero qué gusto que el destino me la hizo elegir. Doy gracias a Dios por permitirme esta manera de ver la vida, por dar mi entrega y dedicación hasta el cansancio, gracias a mi gloriosísimo “Colegio Militar Eloy Alfaro”, por los valores infundidos y hacerme conocer que, Sólo Venciéndote, Vencerás. Quien dejó todo por regalarnos la mejor vida, mi madre, espero poder agradecer todo lo que has hecho por nosotros, ¡Te Amo!. Mi hermano, Dios te pague viejo por todas las alegrías, penas, enojos, que todo eso ha sido para forjarnos, y creo que siempre vamos a estar agradecido con nuestro Ángel, Josepht. Dios les pague a mi papito y mamita, a todos mis ñaños y a todos quienes hicieron parte de esto. Agradezco al Ing. Alexander Robayo, por la confianza que me brindó desde mis inicios en la profesión. Al Ing.

César Leiva, porque cada día es un aprendizaje nuevo. A todos los inges y amigos de la CIGMA. A mi compañero, Santi, ¡esto es solo el comienzo!”.

- Dennys Alexander -

ÍNDICE

CERTIFICACIÓN	i
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD.....	ii
AUTORIZACIÓN.....	iii
DEDICATORIA.....	iiv
AGRADECIMIENTO.....	v
ÍNDICE	1
ÍNDICE DE TABLAS	4
ÍNDICE DE FIGURAS	6
ACRÓNIMOS Y SIGLAS	i8
LISTA DE ANEXOS	9
RESUMEN.....	10
ABSTRACT	11
CAPÍTULO I PROBLEMA	11
1.1 Antecedentes	12
1.2 Planteamiento del Problema.....	13
1.3 Justificación e Importancia	14
1.4 Objetivos	15
1.4.1 Objetivo General.....	15
1.4.2 Objetivos Específicos	15
1.5 Metas	16
CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO	17
2.1 Geodesia.....	17
2.1.1 Definición	17
2.1.2 Clasificación	18
2.2 Sistemas Geodésicos de Referencia	21
2.2.1 Sistemas de Referencia Geocéntricos	21
2.2.2 Marcos de Referencia Geocéntricos	21

2.3 Superficies de Referencia.....	22
2.3.1 Superficie Terrestre (Topográfica)	23
2.3.2 Geoide	23
2.3.3 Nivel Medio del Mar.....	24
2.3.4 Cuasigeoide.....	26
2.3.5 Teluroide	26
2.3.6 Elipsoide	27
2.3.7 Ondulación Geoidal	27
2.3.8 Modelo EGM08	28
2.3.9 Modelo Geométrico IGM – Ecuador	29
2.3.10 Gradiente de Ondulación Geoidal.....	30
2.4 Sistemas de Alturas	30
2.4.1 Altura Nivelada.....	32
2.4.2 Altura Ortométrica	34
2.4.3 Altura Elipsoidal	34
2.4.4 Alturas Normales	35
2.4.5 Relación entre superficies y alturas	36
2.5 Sistema de Posicionamiento Global (GPS).....	39
2.5.1 Introducción	39
2.5.2 Descripción	39
2.5.3 Métodos de Posicionamiento	45
2.5.4 Procesamiento de Datos.....	47
2.5.5 Errores en el posicionamiento.....	53
2.6 Sistemas de Referencia para Ecuador	55
2.6.1 Red de Control Básico Horizontal	56
2.6.2 Red de Control Básico Vertical	56
2.7 Métodos de Nivelación	57

2.7.1 Nivelación Geométrica	57
2.7.2 Nivelación Trigonométrica	58
2.7.3 Nivelación GPS.....	59
CAPÍTULO III METODOLOGÍA.....	61
3.1 Recopilación de datos	61
3.1.1 Modelo EGM08	61
3.1.2 Perfil del Ecuador continental.....	62
3.1.3 Red de Control Básico Vertical	63
3.2 Análisis de variación (gradiente) de Ondulación Geoidal	64
3.3 Zonificación del gradiente de ondulación geoidal	65
3.4 Plan de muestreo de Red de Control Básico Vertical del IGM.....	66
3.5 Posicionamiento GPS	75
3.6 Procesamiento de datos GPS.....	66
3.7 Aplicación de Nivelación GPS.....	75
3.8 Errores entre nivelación geométrica IGM y nivelación GPS	82
3.9 Análisis estadístico de los errores de nivelación GPS	93
CAPÍTULO IV ANÁLISIS DE RESULTADOS	97
4.1 Análisis y Discusión de Resultados	97
CAPÍTULO V CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	102
5.1 Conclusiones	102
5.2 Recomendaciones.....	103
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	104
ANEXOS.....	108

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 <i>Constantes del Sistema WGS84</i>	29
Tabla 2 <i>Estadísticos Modelo Geométrico IGM</i>	29
Tabla 3 <i>Descripción Alturas</i>	38
Tabla 4 <i>Descripción Bloques Satelitales GPS</i>	41
Tabla 5 <i>Funcionamiento Componentes del Segmento de Control</i>	43
Tabla 6 <i>Precisiones Métodos Relativos de Posicionamiento GPS</i>	47
Tabla 7 <i>Órdenes de Nivelación Geométrica para el Ecuador</i>	58
Tabla 8 <i>Zonas de Variación de Ondulación Geoidal</i>	65
Tabla 9 <i>Intersección Líneas de Nivelación y Mapa de Gradiente</i>	67
Tabla 10 <i>Líneas de Nivelación Seleccionadas</i>	68
Tabla 11 <i>Placas Seleccionadas Línea Quito – Latacunga</i>	69
Tabla 12 <i>Placas Seleccionadas Línea Manta – Montecristi</i>	70
Tabla 13 <i>Placas Seleccionadas Línea Cuyuja - Baeza</i>	71
Tabla 14 <i>Placas Seleccionadas Línea Puerto López – La Libertad</i>	72
Tabla 15 <i>Placas Seleccionadas Línea Latacunga - Quevedo</i>	73
Tabla 16 <i>Placas Seleccionadas Línea Ambato – Baños</i>	74
Tabla 17 <i>Parámetros para Configuración Procesamiento TBC</i>	66
Tabla 18 <i>Coordenadas Placa Base Línea Quito - Latacunga</i>	67
Tabla 19 <i>Coordenadas Placas Móviles Línea Quito - Latacunga</i>	68
Tabla 20 <i>Coordenadas Placa Base Línea Manta – Montecristi</i>	68
Tabla 21 <i>Coordenadas Placas Móviles Línea Manta – Montecristi</i>	69
Tabla 22 <i>Coordenadas Placa Base Línea Cuyuja – Baeza</i>	69
Tabla 23 <i>Coordenadas Placas Móviles Línea Cuyuja – Baeza</i>	70
Tabla 24 <i>Coordenadas Placa Base Línea Puerto López – La Libertad</i>	71
Tabla 25 <i>Coordenadas Placas Móviles Línea Puerto López – La Libertad</i>	72
Tabla 26 <i>Coordenadas Placa Base Línea Latacunga - Quevedo</i>	72
Tabla 27 <i>Coordenadas Placas Móviles Línea Latacunga - Quevedo</i>	73
Tabla 28 <i>Coordenadas Placa Base Línea Ambato – Baños</i>	74
Tabla 29 <i>Coordenadas Placas Móviles Línea Ambato – Baños</i>	75
Tabla 30 <i>Nivelación GPS Línea Quito – Latacunga</i>	76

Tabla 31 Nivelación GPS Línea Manta – Montecristi	77
Tabla 32 Nivelación GPS Línea Cuyuja - Baeza	78
Tabla 33 Nivelación GPS Línea Puerto López – La Libertad.....	79
Tabla 34 Nivelación GPS Línea Latacunga - Quevedo.....	80
Tabla 35 Nivelación GPS Línea Ambato - Baños	81
Tabla 36 Errores Alturas Línea Quito - Latacunga	82
Tabla 37 Errores Alturas Línea Manta – Montecristi.....	83
Tabla 38 Errores Alturas Línea Cuyuja – Baeza	85
Tabla 39 Errores Alturas Línea Puerto López – La Libertad	86
Tabla 40 Errores Alturas Línea Latacunga – Quevedo	88
Tabla 41 Diferencias Alturas Línea Ambato – Baños.....	90
Tabla 42 Análisis Estadístico Errores Línea Ambato – Baños	94
Tabla 43 Análisis Estadístico Errores Línea Manta – Montecristi.....	94
Tabla 44 Análisis Estadístico Errores Línea Cuyuja – Baeza	95
Tabla 45 Análisis Estadístico Errores Línea Puerto López – La Libertad	95
Tabla 46 Análisis Estadístico Errores Línea Latacunga – Quevedo	96
Tabla 47 Errores Típicos Nivelación GPS por Distancia	98

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1.</i> Elipsoide achatado en los polos	19
<i>Figura 2.</i> Diferencia entre datums verticales.....	26
<i>Figura 3.</i> Ondulación Geoidal	28
<i>Figura 4.</i> Alturas Físicas y campos equipotenciales	31
<i>Figura 5.</i> Nivelación Geométrica	33
<i>Figura 6.</i> Altura Elipsoidal.....	35
<i>Figura 7.</i> Altura Normal.....	36
<i>Figura 8.</i> Relación entre alturas y superficies	37
<i>Figura 9.</i> Ubicación Estaciones Segmento de Control GPS	42
<i>Figura 10.</i> Simple Diferencia de Fase	48
<i>Figura 11.</i> Doble Diferencia de Fase.....	50
<i>Figura 12.</i> Triple Diferencia de Fase.....	52
<i>Figura 13.</i> Nivelación GPS	60
<i>Figura 14.</i> Muestra de archivos INPUT y OUTPUT, EGM08	61
<i>Figura 15.</i> Modelo Ondulación Geoidal EGM08.....	62
<i>Figura 16.</i> Red de Líneas de Nivelación - Ecuador.....	63
<i>Figura 17.</i> Mapa de Gradiente de Ondulación Geoidal.....	64
<i>Figura 18.</i> Mapa Zonificación Gradiente Ondulación Geoidal.....	66
<i>Figura 19.</i> Intersección Mapa de Gradiente y RCBV	67
<i>Figura 20.</i> Selección Líneas de Nivelación	68
<i>Figura 21.</i> Placas Línea Quito – Latacunga	70
<i>Figura 22.</i> Placas Línea Manta – Montecristi	71
<i>Figura 23.</i> Placas Línea Cuyuja – Baeza.....	72
<i>Figura 24.</i> Placas Línea Puerto López - La Libertad.....	73
<i>Figura 25.</i> Placas Línea Latacunga – Quevedo	74
<i>Figura 26.</i> Placas Línea Ambato – Baños	75
<i>Figura 27.</i> Equipo GNSS Trimble R4	76
<i>Figura 28.</i> Equipo GPS Trimble R3.....	76
<i>Figura 29.</i> Esquema Procesamiento IX-L3-15A.....	67
<i>Figura 30.</i> Esquema Procesamiento M-Q-10-A-JA	68

Figura 31. Esquema Procesamiento XXIX-L1-56A	70
Figura 32. Esquema Procesamiento J-PL-5B.....	71
Figura 33. Esquema Procesamiento IX-L4-90A.....	73
Figura 34. Esquema Procesamiento A-B-11B	74
Figura 35. Croquis de Nivelación Línea Quito – Latacunga	76
Figura 36. Croquis de Nivelación Línea Manta – Montecristi.....	77
Figura 37. Croquis de Nivelación Línea Cuyuja - Baeza.....	78
Figura 38. Croquis de Nivelación Línea Puerto López – La Libertad	79
Figura 39. Croquis de Nivelación Línea Latacunga – Quevedo	80
Figura 40. Croquis de Nivelación Línea Ambato – Baños	81
Figura 41. Errores (ppm) Alturas Línea Quito – Latacunga	83
Figura 42. Errores (ppm) Alturas Línea Manta – Montecristi	84
Figura 43. Errores (ppm) Alturas Línea Cuyuja – Baeza.....	86
Figura 44. Errores (ppm) Alturas Línea Puerto López – La Libertad.....	87
Figura 45. Errores (ppm) Alturas Línea Latacunga – Quevedo.....	89
Figura 46. Errores (ppm) Alturas Línea Ambato – Baños	91
Figura 47. Líneas de Nivelación GPS	92
Figura 48. Resumen Errores Nivelación GPS.....	93
Figura 49. Distancias para un error de 5 cm	99
Figura 50. Distancias para un Error de 10 cm.....	99
Figura 51. Distancias para un Error de 15 cm.....	100

ACRÓNIMOS Y SIGLAS

DORIS: Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite

EGM08: Earth Gravitational Model 2008

EMC: Estaciones de Monitoreo Continuo

GLONASS: Globalnaya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema

GNSS: Global Navigation Satellite System

GPS: Global Positioning System

IAG: International Association of Geodesy

IGM: Instituto Geográfico Militar

IHRS: International Height Reference System

IRNSS: Indian Regional Navigation Satellite System

ITRF: International Terrestrial Reference Frame

ITRS: International Terrestrial Reference System

LLR: Lunar Laser Ranging

NGA: National Geospatial – Intelligence Agency

ODS: Objetivos del Desarrollo Sostenible

ONU: Organización de las Naciones Unidas

PPP: Posicionamiento del Punto Preciso

PSAD 56: Dátum Provisional Sudamericano de 1956

QZSS: Quasi – Zenith Satellite System

RCBV: Red de Control Básico Vertical

RENAGE: Red Nacional GPS del Ecuador

REGME: Red GNSS de Monitoreo Continuo del Ecuador

RTK: Real Time Kinematic

SIG: Sistema de Información Geográfica

SLR: Satellite Laser Ranging

UTM: Universal Transversal de Mercator

VLBI: Very Long Baseline Interferometry

WGS84: World Geodetic System 1984

LISTA DE ANEXOS

ANEXO 1: MODELO DIGITAL DE ONDULACIÓN GEOIDAL EGM08 DEL ECUADOR CONTINENTAL (FORMATO DIGITAL - .TIF - SIG)

ANEXO 2: MODELO DIGITAL DE GRADIENTE DE ONDULACIÓN GEOIDAL DEL ECUADOR CONTINENTAL (FORMATO DIGITAL - .TIF - SIG)

ANEXO 3: INSUMOS DEL PLAN DE MUESTREO DE PLACAS COMPONENTES RED DE CONTROL BÁSICO VERTICAL DEL IGM

ANEXO 4: MEMORIA TÉCNICA DEL TRABAJO DE CAMPO DEL POSICIONAMIENTO GPS

ANEXO 5: INFORMES DE PROCESAMIENTO DE DATOS GPS EN EL SOFTWARE TRIMBLE BUSINESS CENTER

ANEXO 6: ELENCO DE COORDENADAS DE TODOS LOS SITIOS MUESTREADOS DEL PAÍS

RESUMEN

GPS, por sus siglas en inglés (Global Positioning System), es un sistema que trabaja en base a una superficie de referencia, la cual es un elipsoide de revolución, sobre este, se puede obtener la ubicación de cualquier punto en el espacio, mediante la determinación de coordenadas geodésicas: latitud, longitud y altura elipsoidal. La utilización de la altura elipsoidal en trabajos de ingeniería, debido a sus características geométricas, no es viable, ya que para tales proyectos se utilizan alturas referidas a superficies de carácter físico como el geoide o en su defecto el nivel medio de los mar. La determinación de alturas referidas al nivel medio del mar se realiza empleando nivelación geométrica, que es una técnica muy precisa, pero su metodología demanda de considerables recursos técnicos, logísticos y financieros. El objetivo de esta investigación fue validar el método de nivelación GPS en el Ecuador Continental, como alternativa al método tradicional, mediante el análisis de variación de ondulación geoidal para obtener coordenadas verticales referidas al dátum “La Libertad”. Para esta validación se consideró realizar el análisis del gradiente (variación) de ondulación geoidal (EGM08) en el Ecuador Continental, para determinar zonas homogéneas (bajo la hipótesis de que a menor variación de ondulación geoidal, mayor alcance de Nivelación GPS), en las cuales se realizaron mediciones GPS, sobre placas de la Red de Control Básico Vertical del Ecuador, a diferentes distancias para determinar el error relativo del procedimiento propuesto en comparación del método tradicional de nivelación diferencial.

Palabras Clave:

- **RED GNSS DE MONITOREO CONTINUO DEL ECUADOR**
- **SISTEMA DE REFERENCIA GEOCÉNTRICO PARA LAS AMÉRICAS**
- **GEOIDE**
- **SISTEMA GLOBAL DE NAVEGACIÓN SATELITAL**
- **MODELO GRAVITACIONAL TERRESTRE 2008**

ABSTRACT

GPS (Global Positioning System), is a system that works based on a reference surface, which is an ellipsoid, on this, it can get the location of any point in space, through the determination of geodetic coordinates: latitude, longitude and ellipsoidal height. The use of the ellipsoidal height in engineering works, due to its geometric characteristics, is not viable, since for such projects, heights are used referring to surfaces of a physical nature such as the geoid or the mean level of the sea. The determination of heights referred to the mean sea level is done using geometric leveling, which is a very precise technique, but its methodology demands considerable technical, logistical and financial resources. The objective of this work was validate the GPS leveling method in Continental Ecuador, as an alternative to the traditional method, by means of geoid undulation variation analysis to obtain vertical coordinates referring to the "La Libertad" datum. For this validation, it was considered to perform the gradient (variation) of geoid undulation (EGM08), to determine homogeneous zones (under the hypothesis that the lower the geoid ripple variation, the greater the GPS level), in the which GPS measurements were made, on plates of the Basic Vertical Control Network of Ecuador, at different distances to determine the relative error of the proposed procedure compared to the traditional method of differential leveling.

Key Words:

- **CONTINUOUS MONITORING GNSS NETWORK OF ECUADOR**
- **GEOCENTRIC REFERENCE SYSTEM FOR THE AMERICAS**
- **GEOID**
- **GLOBAL NAVIGATION SATELLITE SYSTEM**
- **EARTH GRAVITATIONAL MODEL 2008**

CAPÍTULO I

PROBLEMA

1.1 Antecedentes

GPS, es un sistema que trabaja en base a una superficie de referencia, la cual es un elipsoide de revolución de carácter geométrico. Sobre éste, se puede obtener la ubicación de cualquier punto en el espacio, mediante la determinación de coordenadas geodésicas: latitud, longitud y altura elipsoidal. La aplicación de esta última coordenada, debido a sus propiedades geométricas, en trabajos de ingeniería no es viable, ya que para este tipo de proyectos se utilizan alturas referidas a superficies como el nivel medio del mar (nmm) o una superficie equipotencial como el geoide.

En el Ecuador, según el Reglamento a la Ley de la Cartografía, el plano de referencia oficial de las alturas es el nivel medio del mar, con su origen ubicado en el mareógrafo de La Libertad. A partir de este dátum, se ha materializado la Red de Control Básico Vertical (RCBV) mediante nivelación geométrica (Cañizares, 2015). Sobre estos circuitos de nivelación no se realizaron observaciones gravimétricas, razón por la cual carecen de correcciones del efecto de gravedad, lo que conlleva a que las alturas que se manejan en el país sean de carácter geométrico (Tierra & Acurio, 2016).

El desarrollo de los sistemas de posicionamiento por satélite ha permitido, mediante un rastreo con equipo GPS de precisión, obtener alturas elipsoidales con errores centimétricos. La principal ventaja de la determinación de esta coordenada es que se pueden calcular alturas de carácter físico (referidas al geoide) o alturas sobre el nivel medio del mar, en base a la ecuación (1.1)

$$H = h - N \quad (1.1)$$

Siendo: H: altura ortométrica; h: altura elipsoidal; N: ondulación geoidal.

Cabe recalcar que la ondulación geoidal se obtiene a partir de modelos geoidales locales o globales, los que pueden presentar errores incluso superiores al metro.

1.2 Planteamiento del Problema

La constante actualización de la tecnología ha permitido al mundo entero colocarse en lo que en tiempos pasados se podría haber considerado como “el futuro”. Y, si se dirige el enfoque de estos avances hacia las tecnologías geoespaciales, es relevante considerar el desarrollo que han experimentado los sistemas de navegación global (GPS, GLONASS, GALILEO, entre otros). A partir de estos, actualmente, se determinan coordenadas geodésicas (latitud, longitud y altura elipsoidal) con precisiones centimétricas, incluso milimétricas. No obstante, esta información está referida a un elipsoide de revolución (superficie matemática), mas no al nivel medio del mar que es el plano de referencia oficial para las alturas en el país.

La determinación de las coordenadas verticales referidas al nivel medio del mar se realiza empleando nivelación geométrica, que es una técnica muy precisa, pero su metodología demanda cuantiosos recursos técnicos, logísticos y financieros. Dentro de estos, se considera el personal técnico, cuatro personas como mínimo, dos que transporten las miras, un operador del nivel y una persona que tome nota de las lecturas. Además, se consideran los instrumentos: dos miras o regletas invar, dos placas de apoyo, un trípode y un nivel geodésico. Por otro lado, se deben tomar en cuenta las condiciones ambientales y topográficas ya que estas deben ser óptimas, es decir, no debe existir lluvia, neblina, vientos excesivos o una intensa actividad solar, el terreno debe ser estable y no deben existir pendientes escarpadas. Sin duda alguna, la inclusión de estas variables, vuelven al método de nivelación geométrica eficaz, mas no eficiente.

Para realizar una campaña de nivelación es necesario varios días de trabajo en campo, esto en función de la distancia a una placa componente de la Red de Control Básico Vertical del IGM. Considerando un ejemplo de aplicación, se puede citar el arrastre de nivelación geométrica hasta cierto punto de control topográfico para un proyecto que se encuentre a 15 km de distancia de una placa de nivelación IGM; esta determinación supondría un trabajo de campo entre 4 y 5 días, siempre y cuando las condiciones ambientales y topográficas sean favorables (Blanco, 2010). Pero también es necesario considerar que este tipo de campañas, en ocasiones, vienen acompañadas de sesiones GPS para poder determinar la posición horizontal de los puntos nivelados, lo que incurre en el aumento de recursos.

Bajo las circunstancias expuestas, este estudio pretende brindar una solución a la determinación de coordenadas verticales referidas al nivel medio del mar con errores menores a 15 centímetros; utilizando únicamente técnicas de posicionamiento satelital y aplicando el método de nivelación GPS, tomando como base la Red de Control Básico Vertical del país y analizando la variación de la ondulación geoidal.

1.3 Justificación e Importancia

El conocimiento y representación de la superficie topográfica es el requisito fundamental para dar inicio a la mayoría de proyectos de ingeniería. Es por lo que la partida geodésica para distintos levantamientos ya sean topográficos o fotogramétricos, son puntos de control de coordenadas conocidas (latitud, longitud y altura elipsoidal), que se determinan utilizando posicionamiento GPS. Además, es necesario realizar nivelación diferencial para obtener alturas referidas al nivel medio del mar. Como se mencionó, anteriormente, este tipo de nivelación involucra demasiados recursos que en ocasiones sobrepasan el presupuesto para cumplir con el proyecto. En esencia, para conocer las tres coordenadas (horizontales y vertical) se necesitan de dos tipos de procesos topográficos y geodésicos. Lo más adecuado para adquirir esta información puede ser utilizar una sola técnica de levantamiento, que permita reducir recursos técnicos, logísticos y financieros.

Ante esto, el presente proyecto tiene como objetivo validar el método de nivelación GPS en el Ecuador continental para determinar alturas referidas al nivel medio del mar (alturas oficiales en el país), utilizando únicamente técnicas de posicionamiento satelital, bajo la hipótesis que los errores que presenta este método dependen de la distancia a la base y de la zona de variación de ondulación geoidal donde se encuentren.

Además, ante la responsabilidad de cumplir con los Objetivos del Desarrollo Sostenible propuestos por la ONU, y considerando el documento original de la conferencia sobre el desarrollo sostenible, titulado “El Futuro que queremos”. La presente investigación, ha tomado como referencia este comunicado, en el cual los gobiernos reconocen la importancia de los datos basados en tecnologías geoespaciales, el seguimiento in situ y la información geoespacial fidedigna para la formulación de políticas, la programación y las operaciones de

proyectos de desarrollo sostenible (Naciones Unidas, 2015). Es por lo que, en términos prácticos, este trabajo se alinea con el Objetivo del Desarrollo Sostenible (ODS) 9, Industria, Innovación e Infraestructura.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo General

Validar el método de nivelación GPS en el Ecuador Continental, mediante el análisis de variación de ondulación geoidal para obtener alturas referidas al nivel medio del mar.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Generar un mapa de gradiente de ondulación geoidal en el Ecuador Continental a partir del modelo EGM08 para determinar zonas homogéneas de variación.
- Elaborar un plan de muestreo de las placas componentes de la Red de Control Básico Vertical del IGM a partir de las zonas homogéneas de variación de ondulación geoidal, para validar el método de nivelación GPS.
- Realizar el posicionamiento y post-procesamiento GPS mediante el método estático rápido (máximo 1 hora) sobre placas de la Red de Control Básico Vertical del IGM según el plan de muestreo.
- Aplicar el método de nivelación GPS a partir de las coordenadas derivadas del posicionamiento satelital, las alturas referidas al nivel medio del mar determinadas por el IGM, y la ondulación geoidal del modelo EGM08.

- Realizar un análisis estadístico de los errores obtenidos con el método de nivelación GPS, en cada zona homogénea, para viabilizar la aplicación de esta metodología.

1.5 Metas

- Un mapa de gradiente (variación) de ondulación geoidal en el Ecuador Continental identificando zonas homogéneas.
- Un plan de muestreo de las placas componentes de la Red de Control Básico Vertical del IGM.
- Datos crudos GPS de placas de nivelación posicionadas en cada zona homogénea.
- Elenco de coordenadas de placas de nivelación posicionadas pertenecientes a cada zona homogénea.
- Un cuadro comparativo de las diferencias entre alturas referidas al nivel medio del mar determinadas con nivelación GPS y nivelación geométrica (IGM).
- Un reporte estadístico de los errores obtenidos con nivelación GPS en el Ecuador Continental.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Geodesia

2.1.1 Definición

Según Helmert (1887) (citado por Rapp, 1991), Geodesia es la ciencia que se encarga del estudio de la forma, tamaño y campo gravitatorio terrestre. Por otro lado, un concepto contemporáneo es el mencionado por la Universidad Estatal de Ohio que indica que Geodesia es la “Ciencia interdisciplinaria que utiliza medios espaciales y aéreos remotamente censados, y mediciones basadas en la Tierra para estudiar la forma y el tamaño de la misma, los planetas, satélites, y sus cambios; para determinar en forma precisa posiciones y velocidades de puntos y objetos que se encuentran en la superficie u orbitando el planeta, dentro de un sistema de referencia terrestre definido, y para utilizar ese conocimiento a una variada gama de aplicaciones científicas y de ingeniería, usando las ciencias matemática, física, astronómica y computacional” (Rapp, 1991).

En el 2010, la IAG (International Association of Geodesy), da un concepto mucho más amplio y de acorde a la realidad, aseverando que la Geodesia es una geo-ciencia que trata al planeta Tierra como un sistema dinámico y complejo, que está compuesto de varias capas rodeadas por la atmósfera y los océanos. Además, trata con temas como: el monitoreo de las variaciones en la rotación de la Tierra, determinación de órbitas satelitales, la utilización de técnicas geodésicas satelitales para el monitoreo de la atmósfera, y posicionamiento con una gran precisión de puntos que se encuentren sobre la superficie topográfica tomando en cuenta sus cambios en el tiempo (IAG, 2010).

2.1.2 Clasificación

De lo mencionado en la sección anterior, se infiere que existen varias ramas dentro del campo de la Geodesia, como: Geodesia Física, Geodesia Geométrica, Geodesia Relativista y Geodesia Satelital. Estas se detallan a continuación:

- **Geodesia Física:** Cualquier tipo de campaña geodésica tiene como objetivo determinar magnitudes (ángulos, distancias, etc.). Cada medición está referida a un horizonte local, y su dirección perpendicular corresponde a la del vector aceleración de la gravedad en el punto donde es emplazado el instrumento. Por tanto, es necesario considerar que ciertas magnitudes físicas como la masa y el campo gravitatorio, están muy presentes en la geodesia. Ya que, al colocar un equipo sobre un punto en el terreno para realizar algún tipo de levantamiento, lo referimos a la línea de la plomada, mas no a la dirección normal al elipsoide. En tal sentido, la gravedad terrestre juega un papel muy importante, ya que cuando se representa la superficie terrestre, las alturas que tienen sentido son las de carácter físico (alturas ortométricas HO), referidas al geoide. Por consiguiente, este tipo de alturas son las que se encargan de brindar la figura real de la Tierra en combinación con las coordenadas geodésicas. Como consecuencia de lo mencionado anteriormente, es necesario dedicar estudio y comprensión a temáticas que se enlazan con el entendimiento de la superficie equipotencial del campo gravitacional terrestre. Y esto, conlleva justamente a la competencia que posee la Geodesia Física (Corchete, 2009).
- **Geodesia Geométrica:** Siglos atrás, científicos de la época entraron en conflicto por la aseveración de la forma real del planeta. Isaac Newton, fue un científico que brindó teorías sugiriendo que la Tierra debería ser achatada en los polos y ensanchada en la línea equinoccial. Para lograr resolver con esta situación, la Real Academia de Ciencias destinó dos misiones geodésicas. La primera, acudió hacia Perú, actualmente República del Ecuador, entre los años de 1734-1741, con una latitud de $-1.5'$, los científicos Godin, La Condamine y Bouguer realizaron sus mediciones. Mientras que la segunda expedición se envió a Laponia, a una latitud de 66.3° . Los resultados indicaron que al estar más cercano al polo, 1° de meridiano era mayor que en regiones cercanas a la línea ecuatorial. Siendo así, Newton, acertó con sus teorías de la forma de la Tierra e implicó que el planeta puede

ser representado por un elipsoide achatada en los polos ligeramente, como se muestra en la Figura 1.

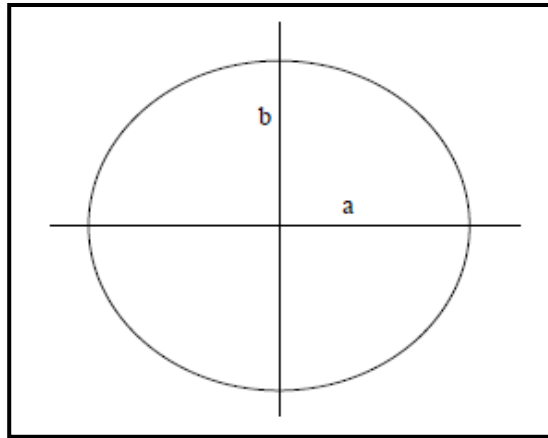


Figura 1. Elipsoide achatado en los polos

Fuente: (Rapp, 1991)

Donde a (semieje mayor) es el radio ecuatorial con una longitud de 6378137 metros y b es el semieje menor.

De manera similar, alrededor del mundo se efectuaron nuevas mediciones para corroborar y perfeccionar el tamaño y la forma terrestre. Como es el caso de Svanberg en Suecia en el año de 1805, Lacaille en Sudáfrica en 1751, entre los años 1821-1823 Gauss y Bessel entre los años de 1831-1838. En la actualidad, se continúan realizando similares estudios refinando y actualizando conocimientos, y aplicarlos en la determinación más exacta de la figura de la Tierra.

Para realizar esto, se debe hacer una relación con la superficie topográfica y una superficie asociada con el nivel del océano. En 1884, Helmert definió el geode como un océano sin peregrinaciones como las ocasionadas por mareas, vientos, corrientes, etc. Este geode fue considerado como la superficie equipotencial del campo de gravedad de la Tierra.

La definición de Helmert no es realizable, debido a que la superficie del océano se comporta dinámicamente, por varios factores que lo alteran. Ante estos problemas, se determinó la superficie que más se aproxime a la figura de la Tierra, y su representación como se menciona es el elipsoide de revolución (superficie matemática). El objetivo de la

Geodesia Geométrica es el estudio de la forma y dimensiones del planeta en base a una superficie matemática de referencia (Rapp, 1991).

- **Geodesia Satelital:** En 1957, la URSS, lanzó el primer satélite artificial de la Tierra, el Sputnik I. Y, a partir de este se puede decir que inició la era de la geodesia espacial o satelital. Al estar en su órbita, se observó que el Sputnik, difundió señales a estaciones con posición conocida, logrando establecer a través de ellas la órbita del satélite. Posterior al conocimiento de esta órbita, sería posible determinar la posición de un receptor que se encuentre sobre la superficie terrestre. En años posteriores al Sputnik, la investigación se enfocó en desarrollar y perfeccionar los diferentes métodos de observaciones satelitales y cálculo de sus órbitas. Este era el camino para implementar sistemas de posicionamiento y determinar el campo gravitatorio de la Tierra, teniendo como resultado el primer sistema de posicionamiento geodésico (Transit) (Huerta, Mangiaterra, & Noguera, 2005).

En la actualidad, varios países del mundo poseen sus propios sistemas de posicionamiento por satélite, GPS (Estados Unidos), GLONASS (Rusia), Galileo (Europa), QZSS (Japón), Beidou/COMPASS (China) e IRNSS (India) (Carrión, 2017). Sistemas que componen al Sistema Global de Navegación por Satélite GNSS.

- **Geodesia Relativista:** El objetivo de la geodesia clásica es la medición y representación de la geometría de la Tierra y de su campo de gravedad. Hace ya 100 años, la teoría de la relatividad general ha demostrado que la geometría y la gravedad no se pueden tratar por separado, y en los últimos años los efectos relativistas se han vuelto más y más relevantes en la geodesia. La geodesia relativista es un campo emergente, y no se puede intentar una definición formal. Por el momento se considera a la geodesia relativista genéricamente como la representación y uso de los principios de la relatividad general en geodesia teórica y para aplicaciones geodésicas. Esto incluye la descripción del espacio-tiempo curvo por sistemas de coordenadas cuatridimensionales, junto con la descripción de trayectorias, energía y el impulso de los cuerpos de prueba, como los satélites, y la descripción de la radiación en escalas geodésicas y para fines geodésicos.

2.2 Sistemas Geodésicos de Referencia

2.2.1 Sistemas de Referencia Geocéntricos

Un sistema de referencia comprende un conjunto de estándares, parámetros, modelos, teorías y constantes que interactúan entre sí, sirviendo como base para la representación de la geometría de la superficie terrestre y su variación en el tiempo, con respecto a ejes coordenados tridimensionales (X, Y, Z) con origen y orientación (Leiva, 2014). En el caso de un sistema geocéntrico de referencia, en una determinada época, el origen coincide con el centro de masas de la Tierra (geocentro), el eje “Z” se superpone sobre el eje del polo de rotación de la tierra, los ejes “X” e “Y” perpendiculares entre sí, se encuentran contenidos en el plano ecuatorial (Barahona, 2016).

Uno de los ejemplos más claros que se tienen actualmente con respecto a sistemas geocéntricos de referencia es el ITRS (International Terrestrial Reference System), Sistema Internacional de Referencia Terrestre, es un sistema de referencia espacial global que rota junto con el planeta en su movimiento en el espacio. El organismo responsable de proporcionar referencias globales a las diferentes comunidades científicas es el Servicio Internacional de la Rotación Terrestre (Martínez, 2010).

2.2.2 Marcos de Referencia Geocéntricos

El Marco de Referencia es la materialización física del Sistema de Referencia. Cada sistema es definido a través de convenciones, y es construido a través de su respectivo marco mediante la inclusión de puntos de alta precisión ubicados sobre la superficie terrestre. Estos puntos, tienen coordenadas tridimensionales y velocidades, dependiendo del sistema al que estén referidos, y son mediante los cuales se puede representar la tierra (Furones, 2011).

Jekeli, (2006) (citado en Cañizares, 2015) afirma que un marco de referencia no puede existir sin un sistema de referencia; mientras que un sistema de referencia no posee un valor práctico si no existe un marco de referencia.

El ITRS, ha sido materializado por el International Terrestrial Reference Frame (ITRF). A este marco lo componen una serie de estaciones ubicadas sobre la superficie terrestre, que poseen información de coordenadas y velocidades en una época determinada. Las coordenadas cartesianas derivadas del ITRF se obtienen mediante la combinación de distintas técnicas geodésicas como: GNSS, VLBI, SLR, LLR y DORIS. Estas poseen una serie de redes de estaciones sobre la superficie terrestre (Martínez, 2010). El primer ITRF que se construyó fue el ITRF94. En la actualidad, el marco vigente es el ITRF14, que entró en funcionamiento el 29 de enero de 2017 (Altamimi, Rebischung, Metivier, & Collilieux, 2016).

2.3 Superficies de Referencia

Esta sección se refiere exclusivamente, a la descripción de las superficies de referencia terrestres que se manejan en geodesia, pero para ello se debe establecer el tipo de utilidad que tiene la misma. Una superficie de referencia permite determinar las correcciones que se deben hacer a las mediciones que se hayan tomado, y al ser utilizadas en conjunto tengan congruencia (Barahona, 2016).

La superficie de referencia en el plano horizontal esta dado mediante el elipsoide de revolución, sabiendo que su origen de coordenadas es un dátum geocéntrico, sin embargo este sistema proporciona una altura matemática, la cual, no tiene nada que ver con las alturas físicas requeridas para trabajos de precisión (Carrión Sánchez, 2013), por ello que para definir una superficie de referencia adecuada se toma al nivel medio del mar como referencia (superficie horizontal) puesto que el agua se mantiene horizontal en cualquier posición en el espacio, considerándolo como un cuerpo no perturbado, pero el nivel medio del mar se encuentra en constante movimiento debido a las mareas, las corrientes, la temperatura, salinidad, etc.; siendo el geoide la única superficie que cumple con las leyes de la física del planeta (Cañizares, 2015) . Una gran cantidad de países tienen su propio dátum vertical que es tomado usualmente por un mareógrafo (instrumento que realiza mediciones en un periodo de tiempo mínimo de 18,6 años), este identifica el nivel medio del mar local en una época

específica, considerando una definición clásica de la coincidencia entre el geoide y el nivel medio del mar, con ello eliminando errores oceánicos (Santacruz, 2015).

Las superficies a las que comúnmente se refiere y que constantemente se involucran en Geodesia son la Superficie Física también conocida como Topográfica, Geoide, Nivel medio del Mar, Cuasigeoide, Teluroide y Elipsoide.

2.3.1 Superficie Terrestre (Topográfica)

La superficie terrestre o topográfica es determinada como un fenómeno continuo que abarca el límite entre las masas sólidas o líquidas y la atmósfera, en esta superficie se encuentran todos los objetos geográficos, mismos que pueden ser observados y medidos sobre la misma base en un conjunto de variables (Longley, Goodchild, Maguire, & Rhind, 2016).

En el conjunto de variables que se pueden calcular una de las más importantes y estudiadas es la altura, puesto que se utiliza en proyectos científicos y civiles (Fisher & Tate, 2006), este tipo de variable se obtiene determinando la distancia entre un punto sobre la superficie terrestre y cualquiera de las superficies de referencia que posteriormente se mencionan, la más utilizada es el nivel medio del mar, que para la mayoría de países está definido como su datum vertical (Paredes, Salinas, Martínez, & Jiménez, 2013).

Sabiendo que el objetivo de la Geodesia es la determinación de la forma real de la Tierra; entonces su estudio se enfoca en la forma y campo gravitacional que se presenta en la misma. Debido a su forma irregular, la Tierra no se puede representar mediante simples algoritmos matemáticos como se explicó anteriormente, se requiere del empleo de puntos de control para formar una red, y así poder obtener a detalle la estructura de las superficie terrestre mediante la interpolación de datos (Torge, 2001).

2.3.2 Geoide

Gauss en 1828, define al geoide como la superficie equipotencial del campo de gravedad de la tierra que más se acerca al nivel medio de los mares en reposo (Sevilla de Lerma, 2012). En el año de 1872, Listing introduce el nombre de geoide a la definición dada por Gauss años atrás y modifica la misma, estableciendo que es la superficie del mar imperturbable intentando con esto fijar el nivel medio del mar en el tiempo, sin embargo en el año de 1985, Moritz y Heiskanen, establecieron que la superficie de los océanos es, después de cierta idealización, la parte de la superficie equipotencial del campo de gravedad de la tierra llamado geoide (Heiskanen & Moritz, 1985).

Otras definiciones nos presentan al geoide como la superficie equipotencial del campo de gravedad de la Tierra, que mejor se ajusta al agua en reposo de los océanos extendido bajo los continentes (Zakatov, 1997). En el año 2001, Torge, establece una definición física para el geoide, mediante la cual se considera al agua de los océanos como un cuerpo homogéneo libre de movimiento y variaciones de tiempo, estando sujeto solo a la fuerza de la gravedad; esta superficie de océanos homogéneos además de alcanzar un equilibrio pueden asumir un nivel de superficie equipotencial del campo de gravedad (Torge, 2001).

En tiempos más modernos, el geoide es considerado como una superficie equipotencial del campo de gravedad de la Tierra, extendiéndose bajo los continentes y coincidiendo con el nivel medio del mar (considerado como un cuerpo en reposo), sin embargo, debido a los constantes cambios o perturbaciones que se presentan en la distribución oceánica, existe una variación en la altura del geoide de unos cuantos centímetros. Estos coeficientes de variación de altura del geoide que se presentan debido al movimiento de aguas continentales en relación con el elipsoide de referencia se calculan al multiplicar el potencial gravitacional de la Tierra (Coeficiente de Stock) por el semieje mayor del elipsoide global. Las variaciones en la altura del geoide con respecto a un elipsoide de referencia se conocen como ondulaciones geoidales y pueden llegar a variar en más o menos 100 m (Ramilien, Frappart, & Seoane, 2017).

2.3.3 Nivel Medio del Mar

El Nivel Medio del Mar (n.m.m) es considerada una de las superficie de referencia más próximas al geoide (superficie de referencia real de la Tierra), por eso se la adoptada en la

mayoría de los países como dátum oficial vertical, pudiéndose obtener esta coordenada vertical precisa a través de toma de información, misma que se realiza en un determinado tiempo (mínimo 19 años para el Ecuador) por parte del mareógrafo.

A partir de esta coordenada precisa se puede obtener la altura en cualquier punto de una superficie a nivel local, y se define como la distancia vertical entre este y la superficie de referencia. El origen de altitudes será el nivel medio del mar, localizado en el mareógrafo de La Libertad (Provincia de Santa Elena) (Cañizares, 2015).

Las mediciones de altura son a nivel local puesto que los mareógrafos se encuentran a distintos niveles por todo el mundo (Cazanave, Palanisamy, & Ablail, 2018), ya que las mareas están distribuidas de manera aleatoria (Thompson et al, 2016), si bien esta información de marea es útil, en la actualidad se están implementando técnicas satelitales para la determinación de variaciones del nivel medio del mar global cada vez con mejor precisión y en un menor intervalo de tiempo (Cazanave et al., 2018).

2.3.3.1 Dátum Vertical

El dátum vertical, se refiere al punto de origen del plano de referencia para las alturas, generalmente el nivel medio del mar. Este es obtenido a partir de registros de mediciones de la dinámica oceánica dentro de un intervalo de tiempo, mediante el uso de un mareógrafo. En el Ecuador, en 1948, el Instituto Geográfico Militar, junto con el Servicio Interamericano de Geodesia, instalan el mareógrafo estándar en el terminal petrolero de la Libertad, provincia del Guayas, hoy Santa Elena (Paredes, 1986)

Entre los años de 1960 y 1961, se calcula el nivel medio del mar, a partir de los datos derivados del mareógrafo por 9 años (1950 – 1959). Este dátum, dio referencia a las cotas que el IGM ha determinado por todo el país mediante nivelación geométrica. Generalmente, todos los países han tomado este tipo de dátum como referencia para sus alturas, lo que ocasiona un problema, ya que no está relacionado a un origen global, lo que indica que no existe un dátum vertical mundial. Es por esto por lo que para transformar alturas referidas de un dátum vertical a otro, se debe conocer el potencial de gravedad entre los dos puntos (Jekeli, 2006).

En la Figura 2, se considera el ejemplo de la diferencia que existe entre datums verticales, esta no es cero. Se aprecia que el plano del nivel del mar que pasa por el punto P_0 difiere totalmente del plano que atraviesa por el punto Q_0 .

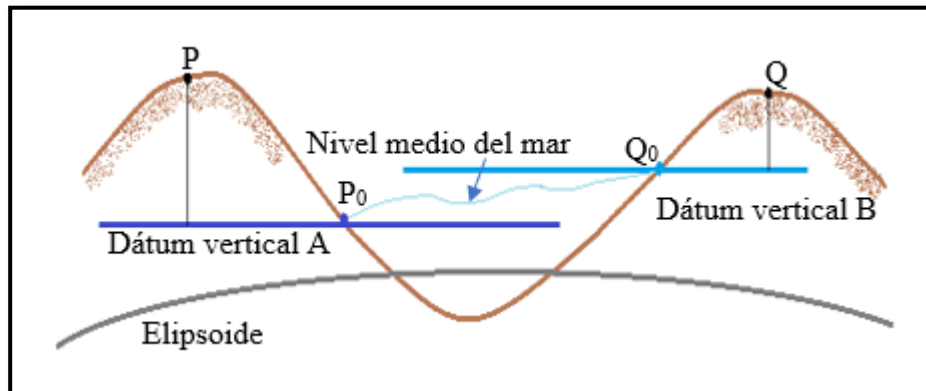


Figura 2. Diferencia entre datums verticales

Traducido de: (Jekeli, 2006)

2.3.4 Cuasigeoide

Es una superficie de referencia, no equipotencial determinado en la teoría de Molodensky, que varios países emplean para la obtención de un nuevo tipo de altura física (altura normal); evitando de esta manera la hipótesis de densidad de la Tierra y distribución de masas que se necesita para el cálculo de alturas ortométricas (Seeber, 2003).

El cuasigeoide y geoide se encuentran muy cercanas entre sí, en lugares pocos elevados su separación varía en el orden de los mm y cm; mientras que en lugares muy elevados puede llegar a ser de un metro (Torge, 2001).

2.3.5 Teluroide

En el año de 1960, Hirnoven, propuso definir el Teluroide como una superficie que se encuentra muy cercana a la superficie terrestre, la diferencia entre ellas se conoce como anomalía de alturas, al igual que entre el cuasigeoide y elipsoide. Esta superficie se utilizó para calcular una primera aproximación de la anomalía de alturas empleando la expresión de Stokes, sin embargo, puesto que el Teluroide no tiene un significado equipotencial, se deben incorporar términos adicionales para la determinación de la anomalía de alturas (Introcaso, 2006).

2.3.6 Elipsoide

El elipsoide es el modelo matemático que representa la Tierra, se implementó cuando se demostró que la verdadera forma de la Tierra era elipsoidal; ya que en tiempos antiguos se consideraba a la esfera como figura de representación (Cañizares, 2015). La aproximación del elipsoide de revolución con la superficie terrestre se produce por la forma similar que poseen, además, que el eje menor del elipsoide coincide con el eje de rotación de la Tierra.

A partir de ahí se ha utilizado este modelo matemático (elipsoide) para el cálculo de coordenadas sobre la superficie terrestre, pudiéndose calcular cualquier punto siempre y cuando se cumpla con lo explicado en la sección 2.1.3.2, el cual se refiere a que la vertical del punto debe ser la misma tanto para el elipsoide (normal) como para el geoide (línea de la plomada) (Carrión Sánchez, 2013).

Existen varios parámetros a determinarse en el elipsoide de revolución: los semiejes (a y b), achatamientos (f) y excentricidades (e); los principales elipsoides utilizados en geodesia son el GRS80 y el WGS84 que utilizan los marcos de referencia ITRF y el WGS84 (Leiva, 2014).

2.3.7 Ondulación Geoidal

La ondulación geoidal se define como la diferencia entre altura elipsoidal y la altura ortométrica, (ver ecuación 1.1) esto expresado gráficamente, se puede apreciar en la Figura 3.

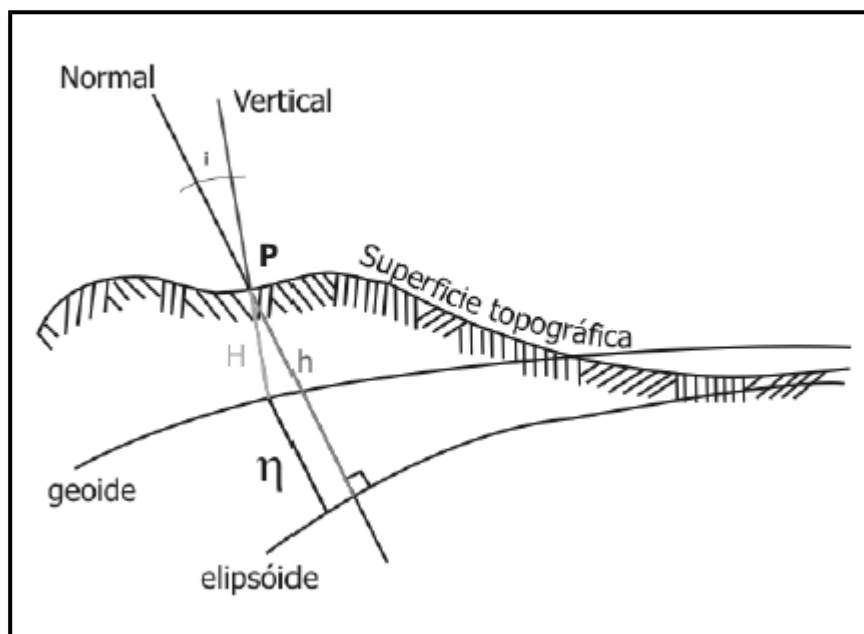


Figura 3. Ondulación Geoidal

Fuente: (Leiva, 2014)

2.3.8 Modelo EGM08

El Modelo Gravitacional Terrestre del 2008 (EGM08) fue oficialmente publicado por la Agencia de Inteligencia-Geoespacial Nacional de Estados Unidos (NGA, por sus siglas en inglés). Este modelo gravitacional está completo para armónicos esféricos de grados y orden 2159 y contiene coeficientes adicionales que se extienden al grado 2190 y al orden 2159. Además, la resolución espacial que brinda este modelo es de 1 minuto de arco, aproximadamente 1857 metros (Pavlis, Holmes, Kenyon, & Factor, 2012).

Las constantes del Sistema WGS84 utilizadas para definir el elipsoide y las asociadas al campo de gravedad normal, al que se hace referencia las ondulaciones geoidales se detallan en la Tabla 1:

Tabla 1
Constantes del Sistema WGS84

Identificación	Valor de la constante	Descripción
a	6378137.00 m	Semi-eje mayor del elipsoide
f	1/298.257223563	Achatamiento del elipsoide
GM	$3.986004418 \times 10^{14} \text{ m}^3\text{s}^{-2}$	Producto de la masa de la tierra y la constante gravitacional
ω	7292115×10^{-11}	Velocidad angular de la Tierra

Fuente: (Pavlis et al., 2012)

2.3.9 Modelo Geométrico IGM – Ecuador

El Instituto Geográfico Militar de Ecuador, en el año de 2014, desarrolló el modelo geoidal local para el país, mediante la utilización del método geométrico para determinar alturas niveladas y junto con datos tomados con GPS (alturas elipsoidales). A partir del uso de esta información, se utilizaron técnicas de redes neuronales artificiales para modelar el geoide local. En base a esto, se obtuvieron alturas elipsoidales referidas al elipsoide GRS80, y alturas niveladas referidas al dátum vertical oficial La Libertad. Para lograr predecir ondulaciones geoidales locales, se entrenó una red neuronal artificial del tipo Radial Basis Functions (RBF) (Tierra & Acurio, 2016). Los estadísticos que presenta este modelo se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2
Estadísticos Modelo Geométrico IGM

Estadístico	Diferencia (error)
Máximo	0.33 m
Mínimo	-0.30 m
Media aritmética	0.02 m
Desviación estándar	0.13 m

Fuente: (Tierra & Acurio, 2016)

2.3.10 Gradiente de Ondulación Geoidal

En términos simples, el gradiente corresponde a la variación que presenta una magnitud en función de un avance en distancia. Si se traslada esta definición al presente estudio, el gradiente o variación de ondulación geoidal corresponde al incremento o disminución de esta altura en función de la distancia.

En el Ecuador, se tendrá un mayor valor de gradiente donde la superficie topográfica sea muy irregular como en las estribaciones de las cordilleras. Los valores más bajos, se encontrarán en las planicies donde el terreno no se vea alterado por elevaciones, como en la región Costa, Amazonía y en valles interandinos.

2.4 Sistemas de Alturas

En nivelación geométrica el sistema de medición se alinea verticalmente con la línea de la plomada del campo de gravedad terrestre en ese punto; por tanto, el plano del horizonte del instrumento coincide con la tangente al campo equipotencial en dicho punto. Con esto, los desniveles (dn) medidos corresponden con la sección de la línea de la plomada, que coinciden con el eje vertical de las regletas o miras, entre la superficie terrestre y la tangente al equipotencial realizada por el instrumento.

Debido a que la separación entre dos superficies equipotenciales varía con la gravedad, existe un no paralelismo, por tanto, el campo de gravedad afecta altamente a la determinación de alturas mediante la nivelación clásica. La Figura 4 muestra, por ejemplo, como la altura del punto B depende del trayecto de nivelación, si este trayecto coincide con la sección II muestra una altura mayor para el punto B, que la que se obtendría si la trayectoria que se sigue coincide con la sección I. Los desniveles (dn), medidos en un circuito cerrado, presentan errores aleatorios de observación, y además el error de cierre teórico, este impide que las alturas referidas al nivel medio del mar sean utilizadas de manera directa y obliga a que se corrija el efecto de la gravedad (Sánchez, 2002).

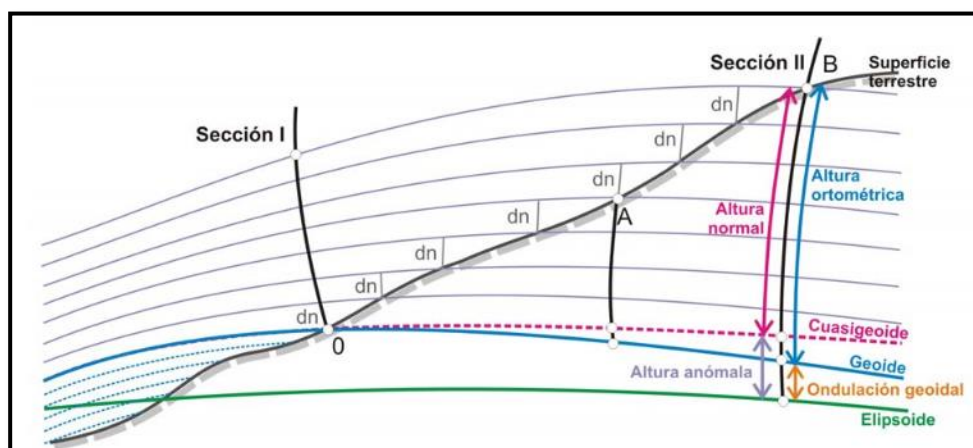


Figura 4. Alturas Físicas y campos equipotenciales

Fuente: (Sánchez, 2002)

Si se considera que la derivada direccional del potencial se corresponde con la componente del vector de fuerza en dicha dirección, a lo largo de la línea de la plomada, se tiene la ecuación (2.1):

$$dW = -g \, dn \quad (2.1)$$

Ésta última ecuación que mediante la integración entre A y B con respecto a δn , se expresa como:

$$-\int_A^B dW = \int_A^B g \, \delta n = \hat{g}(H_B - H_A) = W_A - W_B \quad (2.2)$$

Por tanto, la diferencia de nivel entre alturas ($H_B - H_A$), medida entre los puntos A y B, ubicados en la superficie topográfica y sobre distintos equipotenciales W_A y W_B , se puede expresar de acuerdo con la ecuación (2.3):

$$dn_{BA} = (H_B - H_A) = \frac{W_A - W_B}{\hat{g}} \quad (2.3)$$

Donde \hat{g} es la gravedad media a lo largo de la línea de nivelación entre los campos equipotenciales W_A y W_B .

Si el punto de la medición se encuentra sobre el equipotencial 0 (geoide), la diferencia de potencial se conoce como cota o número geopotencial y se define según la ecuación (2.4):

$$C_B = W_0 - W_B = \int_0^B g \delta n \cong \sum_0^B g dn \quad (2.4)$$

Donde g se asume la gravedad media de los dos puntos nivelados consecutivamente. Según Torge (2001) (citado en Sánchez, 2002), la determinación del número geopotencial es unívoca, ya que este no depende del trayecto de nivelación y si se encuentra en un circuito cerrado satisface la condición que $\oint dW = 0$. La unidad dimensional de medida de los números geopotenciales es kiloGal por metro [kGal m], que es equivalente a $[10 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}]$.

Por tanto, se puede obtener la altura del punto B, según la ecuación (2.5):

$$H_B = \frac{W_0 - W_B}{\hat{g}} = \frac{C_B}{\hat{g}} \quad (2.5)$$

\hat{g} es el valor de la gravedad media entre la superficie W_0 y el punto nivelado W_B . La diferencia entre $W_0 - W_B$ es constante, la altura del punto B depende del valor de la gravedad media utilizado; así, y en función de su estimación, se consideran diferentes tipos de alturas físicas como las dinámicas, ortométricas y normales. Éstas son obtenidas a partir del ajuste de los números geopotenciales, cumpliendo la condición $\oint dW = 0$ ó, aplicando las correcciones métricas a los desniveles medidos $\oint dn \neq 0$, de modo de que se de la conversión a cantidades físicas y se ajusten cumpliendo la condición de los números geopotenciales.

2.4.1 Altura Nivelada

Este tipo de alturas se obtienen mediante el proceso de nivelación geométrica, a partir de métodos ópticos de medición (nivel geodésico). Las diferencias de nivel observadas tienen una variación con respecto al campo de gravedad o campo equipotencial correspondiente al sitio de observación (Sánchez, 2002). Esto se puede apreciar en la Figura 5.

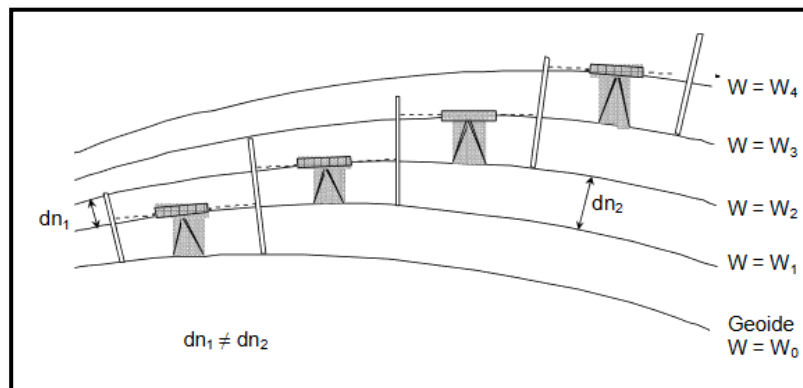


Figura 5. Nivelación Geométrica

Fuente: (Sánchez, 2002)

Las distancias dn , son observadas y corresponden a la longitud que existe entre las diferentes superficies equipotenciales del campo de gravedad. La sumatoria de estas cantidades (dn), permite conocer la diferencia de altura entre el dátum vertical, y los puntos de interés. Pero, se deben hacer ciertas consideraciones, debido a la forma elipsoidal de la Tierra, su distribución de masas y el no paralelismo entre las superficies equipotenciales, es por ello que los valores de nivelación varían dependiendo del trayecto que se tome para la nivelación (diferentes valores de altura para el mismo punto).

Esto conlleva a que sean utilizadas en áreas pequeñas que no requieran considerar las variaciones en el campo de gravedad terrestre ni la figura elipsoidal del planeta. La efectividad de su aplicación se aprecia en redes locales que tengan una extensión inferior a 10 kilómetros.

El cálculo de esta altura nivelada (H^n) se determina a partir de la resta de la altura elipsoidal (h) menos la distancia entre el elipsoide y el nivel medio de los mares (η), como se muestra en la ecuación (2.6).

$$H^n = h - \eta \quad (2.6)$$

2.4.2 Altura Ortométrica

Es una altura física dada por la distancia existente a lo largo de la línea de la plomada desde un punto en la superficie terrestre a otro en el geoide, tomando en cuenta una gravedad media (g') (gradiente vertical de gravedad) existente entre los mismos y que está en función a la distribución interna de masas (de Freitas, 2015); al dividir los número geopotencial de las superficies utilizadas (punto en la superficie terrestre y geoide) para el valor de gravedad media se puede obtener alturas ortométricas, dependiendo su precisión de la gravedad media (Leiva, 2014).

La obtención del número geopotencial se obtiene mediante la diferencia de los potenciales, el problema para la determinación de este tipo de alturas radica en el valor aproximado que se puede determinar de la gravedad media (actúa por toda la línea de la plomada), puesto que es difícil medir este fenómeno en las capas internas de la Tierra (Heiskanen & Helmut, 1967). Según Blitzkow et al, (sf) los métodos más utilizados para la obtención de alturas ortométricas son las hipótesis propuestas por Helmert, Vignal, Baranov y Aire libre (Leiva, 2014).

Por todo lo presentado anteriormente, la recomendación oficial de SIRGAS para la obtención de alturas físicas es adoptar las alturas normales, sin embargo, algunos países quieren usar alturas ortométricas, en tal virtud fue definido un nuevo Sistema Vertical de Referencia en términos de cantidades geopotenciales ($W_0=62636583.4 \text{ m}^2 * \text{s}^{-2}$, nivel de referencia y número geopotencial es tomado como una coordenada primaria) (de Freitas, 2015) (Carrión, 2017), en el Ecuador se reemplaza a la altura ortométrica por las alturas niveladas que están referidas al nivel medio del mar.

2.4.3 Altura Elipsoidal

La altura elipsoidal es la distancia entre un punto cualquiera en la superficie terrestre y una superficie de referencia para este caso el elipsoide, y actúa sobre la línea de la normal a este (Figura 6).

Este tipo de alturas se calculan mediante de un sistema de coordenadas cartesianas referidas al centro del elipsoide mejor conocido como geocentro, es por ello que su magnitud y dirección dependerá del elipsoide seleccionado (Sánchez & Martínez, 1997).

Actualmente, y debido a la apertura que existe en la utilización de técnicas de navegación y posicionamiento satelital GNSS en el empleo de trabajo ingenieril, es necesario considerar este tipo de alturas, ya que al ser alturas geométricas no consideran el campo de gravedad de la tierra (de Freitas & Blitzkow, 1999).

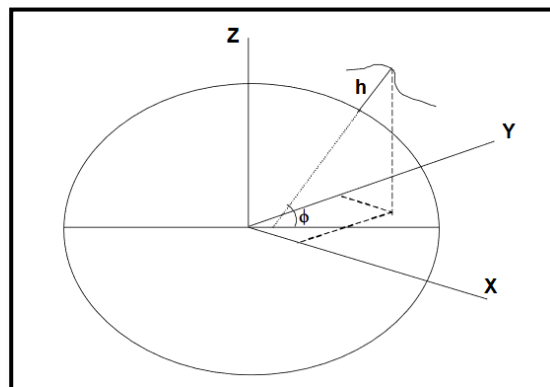


Figura 6. Altura Elipsoidal

Fuente: (Sánchez, 2002)

2.4.4 Alturas Normales

Este tipo de alturas son medidas a lo largo de la línea de la plomada de la superficie de referencia (cuasi-geoide) desde un punto en la superficie terrestre (Figura 7). Este tipo de alturas no toma en cuenta la distribución de masas (Torge, 2001), se miden mediante el empleo de una gravedad normal y se asume que es igual a una gravedad real (W) (Cañizares, 2015).

Para el cálculo de estas alturas reemplazamos la ecuación 2.5 con el de gravedad normal media a lo largo de la línea de la plomada y se lo puede calcular en cualquier elipsoide referido, obteniendo la ecuación 2.7.

$$H^N = \frac{C}{\gamma} \quad (2.7)$$

Donde:

H^N = Altura normal

C = número geopotencial

γ = gravedad media normal

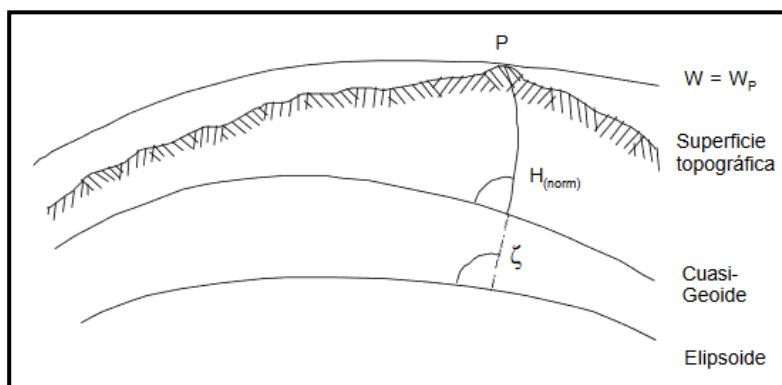


Figura 7. Altura Normal

Fuente: (Sánchez, 2002)

2.4.5 Relación entre superficies y alturas

En la Figura 8, se aprecia la relación entre las superficies de referencia que se detallaron en la sección (2.3), y los diferentes tipos de alturas que se derivan de estas.

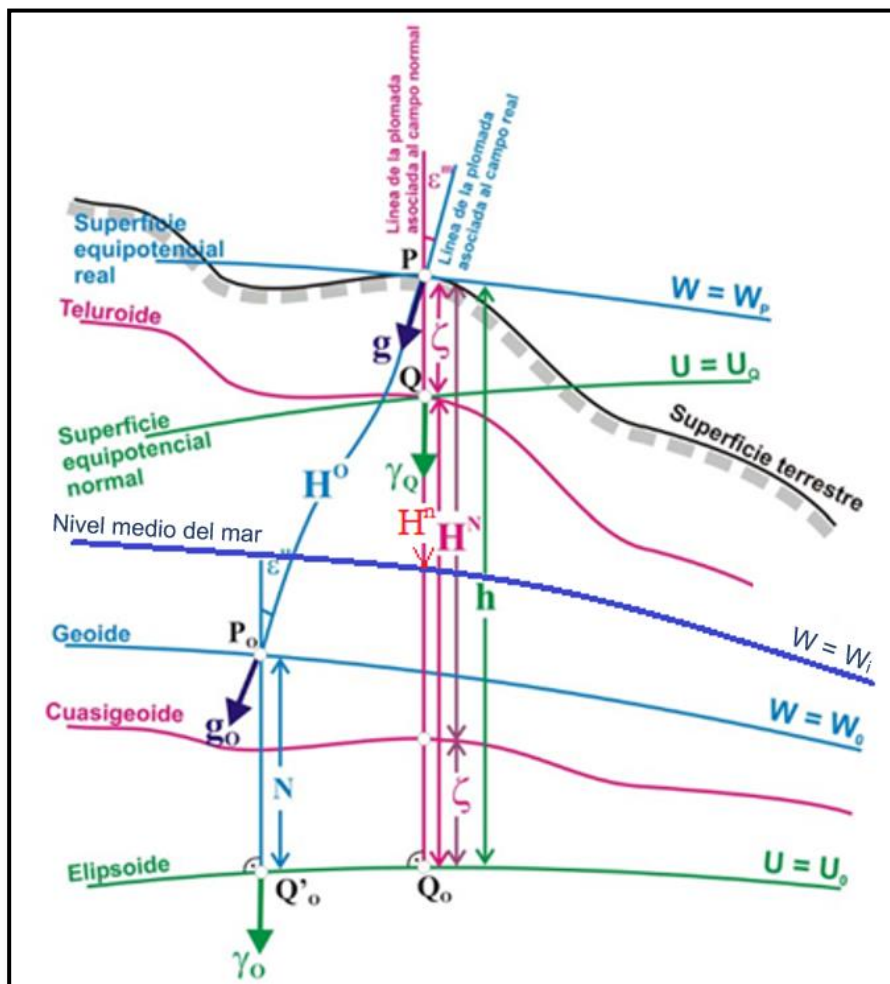


Figura 8. Relación entre alturas y superficies

Adaptado de: (Sánchez, 2002)

En la Tabla 3, se muestra la descripción más detallada de cada una de estas variables:

Tabla 3
Descripción Alturas

Variable	Significado	Descripción
H	Altura Ortométrica	Distancia entre un punto P en la superficie terrestre y el geoide, siguiendo la línea de la plomada
Hⁿ	Altura Nivelada	Distancia entre un punto P sobre la superficie terrestre y el nivel medio del mar sin considerar correcciones gravimétricas.
H^N	Altura Normal	Distancia entre un punto P en la superficie terrestre y el cuasigeoide. Igualmente se tiene el mismo valor entre el elipsoide y el teluroide
h	Altura elipsoidal	Distancia entre un punto P sobre la superficie terrestre y el elipsoide, siguiendo la recta normal a este
ζ	Altura Anómala	Distancia entre el cuasigeoide y el elipsoide. El mismo valor se tiene entre la superficie terrestre y el teluroide

Fuente: (Sánchez, 2002)

2.5 Sistema de Posicionamiento Global (GPS)

2.5.1 Introducción

El Sistema de Posicionamiento Global (GPS), debido a las ventajas que presenta, su uso es cada vez más frecuente en diversas áreas de la parte geoespacial entre ellas la geodesia, topografía, geodinámica, etc. GPS, es una constelación de satélites que proporciona coordenadas precisas en cuanto a posición velocidad y tiempo dentro de la superficie terrestre para sus usuarios civiles y militares; especificando usuarios civiles y militares, ya que en un principio este tipo de sistemas se desarrolló para usos eminentemente militares. En la actualidad, GPS (Estados Unidos), es solo una constelación de un amplio conjunto de las que se destacan: GLONASS (Rusia), Galileo (Europa), QZSS (Japón), COMPASS (China) e IRNSS (India), al Sistema de Posicionamiento Global por Satélite (GNSS).

2.5.2 Descripción

GPS, se compone de tres segmentos. El segmento espacial controla las características de la constelación, su composición, su puesta en órbita, etc. El segmento de control identifica las posiciones de los satélites, y controla sus desplazamientos. Finalmente, el segmento de usuario, lo constituyen todos los instrumentos utilizados para la recepción de señales derivadas de los satélites (Huerta et al., 2005). Estos, se los detalla a profundidad a continuación.

2.5.2.1 Segmento Espacial

El segmento espacial está constituido por los satélites que forman una constelación y las señales estas emiten hacia los receptores. Los satélites se encuentran ubicados en sus respectivas orbitas dando vueltas alrededor de la Tierra; mientras que las señales de radio son

las que ayudan en la corrección de errores de posicionamiento, la principal señal emitida se deriva las portadoras que dependiendo la constelación utilizada puede variar (Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 2007).

GPS es una constelación que está constituida por 24 satélites distribuidos en 6 órbitas circulares con una inclinación de 55° sobre la línea de horizonte, existen reemplazos que se lanzan cada cierto tiempo como bloques, debido a que su vida útil llega a terminar ya sea por envejecimiento (vida útil), averías en partes electrónicas que no se pueden reparar (Huerta et al., 2005)

Este tipo de satélites no son geoestacionarios, el tiempo en el que completan una vuelta a su órbita es de aproximadamente 12 horas, es por este tiempo y el dato de ángulo de inclinación de cada una de las orbitas dado en el párrafo anterior que GPS puede garantizar que se puedan observar un mínimo de 4 satélites en cualquier parte del mundo. Es por lo que la Fuerza Aérea de los Estados Unidos se compromete a mantener la disponibilidad de 24 satélites operativos. Actualmente, se cuenta con 31 satélites operativos alrededor del planeta (GPS, 2018).

Dentro de los satélites que se encuentran operativos de GPS, consta de nuevos y antiguos y comprenden los bloques de las generaciones actuales de satélites GPS, incluidos el Bloque IIA (2^a generación, "Avanzado"), el Bloque IIR ("Reposición"), el Bloque IIR-M ("Modernizado"), el Bloque IIF ("Seguimiento"), GPS III y GPS IIIIF (Seguimiento), sus características se pueden observar en la Tabla 4 (GPS, 2018).

Tabla 4
Descripción Bloques Satelitales GPS

	Satélites Iniciales		Satélites Modernos		
	BLOQUE IIA	BLOQUE IIR	BLOQUE IIR-M	BLOQUE IIF	BLOQUE GPS III/IIF
Satélites	1	11	7	12	En producción
CARACTERÍSTICAS	Código de adquisición básica (C / A) en frecuencia L1 para civiles.	Código de adquisición básica (C / A) en frecuencia L1 para civiles.	Todas las señales heredadas.	Todas las señales del bloque IIR-M	Todas las señales de Block IIF
	Código P (Y) preciso en las frecuencias L1 y L2 para usuarios militares.	Código P (Y) preciso en las frecuencias L1 y L2 para militares.	2ª señal civil en L2 (L2C)	3a señal civil en frecuencia L5 (L5)	4ª señal civil en L1 (L1C)
	Vida útil de diseño de 7.5 años.	Monitoreo a bordo del reloj.	Nuevas señales de códigos M militares	Relojes atómicos avanzados	Mayor confiabilidad, precisión e integridad de la señal
	Lanzado en 1990-1997.	Vida útil de diseño de 7.5 años	Niveles de potencia flexibles para señales militares.	Precisión mejorada, intensidad de señal y calidad.	No hay disponibilidad selectiva
		Lanzado en 1997-2004	Vida útil de diseño de 7.5 años	Vida útil de diseño de 12 años	Vida útil de diseño de 15 años
			Lanzado en 2005-2009	Lanzado en 2010-2016	IIF: reflectores láser; carga útil de búsqueda y rescate
					Primer lanzamiento en 2018

Fuente: (GPS, 2018)

2.5.2.2 Segmento de Control

El segmento de control de GPS consiste en una red global de instalaciones terrestres equipadas con receptores doble frecuencia (L1/L2/L5) y un reloj de cesio, además posee

coordenadas conocidas con gran precisión. Estas instalaciones rastrean satélites de GPS, monitorean sus transmisiones, realizan análisis y envían comandos y datos a la constelación (Huerta et al, 2005).

El Segmento de Control denominado como Segmento de Control Operacional (OCS) actualmente incluye una estación de control maestra, una estación de control maestra alternativa, 11 antenas de comando y control y 16 sitios de monitoreo, distribuidas en todo el mundo, como se muestra en la Figura 9 (GPS, 2018).

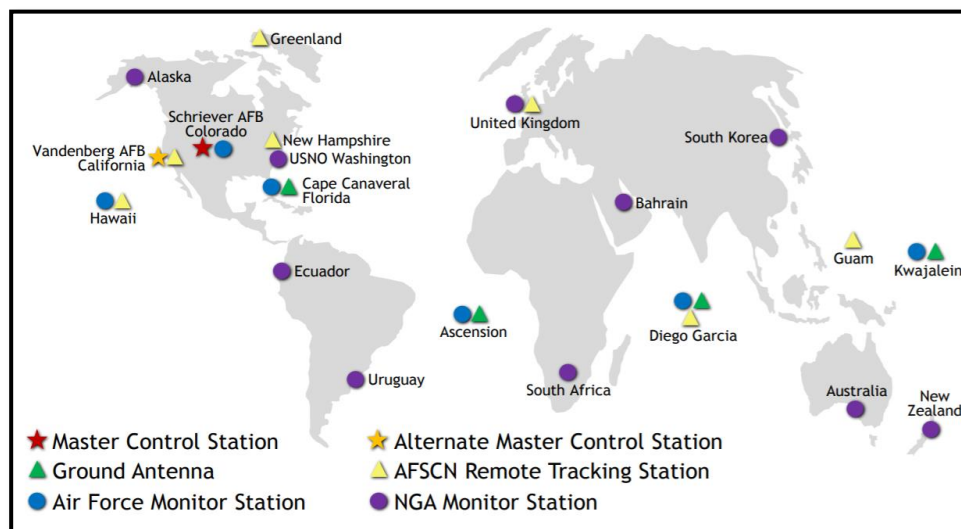


Figura 9. Ubicación Estaciones Segmento de Control GPS

Fuente: (GPS, 2018)

El 2SOPS (2º Escuadrón de Operaciones Espaciales de los EE. UU) y 19SOPS (19º Escuadrón de Operaciones Espaciales de la Fuerza Aérea de los EE. UU.), ubicados en la Base de la Fuerza Aérea Schriever, Colorado, son los encargados del llamado Segmento de Control en GPS, y tienen la responsabilidad de mantener los satélites en correcto funcionamiento. Esto incluye mantener los satélites en sus posiciones orbitales adecuadas (llamada mantenimiento de la estación), y monitoreando su estado. Otra de sus responsabilidades es actualizar el reloj de cada satélite, las efemérides, el almanaque y otros indicadores, el mensaje de navegación una vez al día o según sea necesario (Kaplan & Hegarty, 2006). El segmento de control se divide en tres fases que se detallan en la Tabla 5.

Tabla 5
Funcionamiento Componentes del Segmento de Control

Estaciones de monitoreo	Estación de Control Maestro	Antenas de tierra
Rastrea los satélites GPS a medida que pasan por encima.	Encargada de proporcionar comandos y controlar la constelación de GPS.	Envía comandos, cargas de datos de navegación y cargas de programas de procesadores a los satélites.
Recopilar señales de navegación, mediciones de rango / portadora y datos atmosféricos.	Utiliza información proporcionada por las estaciones de monitoreo para calcular ubicaciones precisas de los satélites	Recoger telemetría
Enviar observaciones a la estación de control maestra.	Genera mensajes de navegación para subir a los satélites.	Comuníquese a través de la banda S y realice un rango de banda S para proporcionar resolución de anomalías y soporte de órbita temprana.
Utilizar sofisticados receptores GPS.	Monitorea transmisiones satelitales, salud de la constelación con esto garantizando la confianza en cuanto a precisión de la constelación.	Consta de 4 antenas GPS terrestres dedicadas más 7 estaciones de seguimiento remoto de la Red de Control de Satélites de la Fuerza Aérea (AFSCN).
Proporcionar cobertura global a través de 16 sitios: 6 de la Fuerza Aérea de los EE.UU.	Resuelve las anomalías que se presentan en los satélites incluido su reposicionamiento, manteniendo así a la constelación funcional de manera óptima.	
	Actualmente utiliza sistemas separados (AEP y LADO) para controlar satélites operativos y no operativos	
	Respaldado por una estación de control maestra alternativa completamente operativa	

Fuente: (GPS, 2018)

2.5.2.3 Segmento de Usuario

Este segmento se encuentra esencialmente constituido por los instrumentos utilizados para la recepción de señales de navegación, medición de parámetros de navegación y procesamiento de mediciones. Está formado por los receptores y antenas (Huerta et al, 2005).

- Antena receptora, las coordenadas que se calculan corresponden al centro radioeléctrico de la antena. Puede ser de muchas formas y materiales dependiendo de las aplicaciones y del coste del receptor.
- Receptor, basado en un número limitado de canales, mínimo 4, siendo el encargado de recibir la frecuencia en la antena a una baja frecuencia y procesarla, realizando todo este proceso simultáneamente. Contiene un reloj de cuarzo, un microprocesador y una memoria interna que puede llegar a almacenar una gran cantidad de horas de rastreo.

Existen dos tipos básicos de receptores:

- Los que rastrean tanto el código P, código P(Y) (para usuarios PPS) como el código C / A.
- Los receptores que solo rastrean el código C / A.

Las frecuencias de portadora en las que trabajan los satélites GPS son: L1= 1.575 MHz, L2 = 1.227 MHz y L5 = 1.176 MHz.

La frecuencia L1 está modulada con el código C/A y el código P; mientras L2 está modulada solamente con el código P. De estos dos tipos de receptores básicos, existen otras variaciones, como los receptores de seguimiento L2 sin código, que rastrean el código C / A en L1 y la fase portadora de las frecuencias L1 y L2.

Se pueden clasificar a los usuarios en dos clases los autorizados y estándar:

Usuarios Precise Positioning Service (PPS): Son usuarios autorizados que pueden controlar el acceso mediante funcionamiento Selective Availability (S/A) y Anti Spoofing (A/S). El funcionamiento Selective Availability (S/A) impide que los usuarios no autorizados obtengan acceso a la plena exactitud manipulando los datos, los mismos desaparecen cuando el usuario autorizado tiene receptores con facultades (S/A); mientras en el funcionamiento de Anti Spoofing (A/S) maneja código cifrado para no permitir el acceso a datos exactos a usuarios no autorizados, para obtener resultados fiables es necesario contar con equipo que tenga facultades (A/S) (equipos criptográficos), permitiendo de esta manera código P (Y), este código Y tiene una criptografía (Kaplan & Hegarty, 2006).

Standard Positioning Service (SPS): Son los usuarios civiles que tienen acceso a la frecuencia L1. Por ello en los últimos años se han desarrollado nuevas frecuencias de uso

civil, y así contar con datos robustos y confiables. Las señales que GPS está lanzando para uso civil son: L2C, L5 y L1C; siendo L2C una variación de la frecuencia ya conocida como L2, que ofrece mejores estándares de rastreo ya se te observa una mayor resistencia al error de multitrayectoria, estabilidad de señal superior, mejor capacidad de rastreo (se pierden ciclos en zonas de obstrucción), y en combinación con la señal L1 en un receptor de doble frecuencia se corrigen errores de retardo producidos por la ionósfera (GPS, 2018).

L5 es otra alternativa a los usuarios civiles especialmente fue creada para transporte, seguridad y otras aplicaciones de alto rendimiento, posee una frecuencia de 1176 MHz contando con mayor ancho de banda y potencia. La señal L5 en combinación con la L1 y L2C, puede mejorar la precisión de datos GPS mediante la técnica conocida como trilateración. En el 2014 se empezaron a transmitir las señales para uso civil, sin embargo L5 siendo pre-operativo.

L1C fue desarrollada por los Estados Unidos y Europa como una señal civil que permita la interoperabilidad entre los distintos sistemas de navegación como: GPS y Galileo, posee el mismo radio de frecuencia que L1 y empezara a transmitir con los satélites GPS III (GPS, 2018).

2.5.3 Métodos de Posicionamiento

- **Método Relativo Estático:** Este tipo de métodos de posicionamiento cuentan con dos receptores mínimo, el estático en particular es uno de los métodos más precisos para la determinación de coordenadas de un punto no conocido que puede estar en movimiento una vez cumpla con el tiempo establecido (movil), a otro de coordenadas establecidas que permanece fijo durante todo el levantamiento (base), a pesar de su precisión conlleva un tiempo relativamente alto esta medición, el mismo que dependiera de la separación que exista entre los receptores (longitud de línea base), número de satelites, geometría de los satelites, y las perturbaciones ionosféricas que varían dependiendo de la hora, mes, año, posición geográfica (LEICA GEOSYSTEMS, 2003).

- **Método Relativo Estático Rápido:** Una variación del método Estático es el llamado “Estático Rápido” y reduce los tiempos de toma de datos de varias horas a solo una hora o menos, también dependiendo de factores mencionados en el apartado anterior especialmente la distancia que existe entre el móvil y su base.
- **Método Relativo Cinemático:** El concepto es similar al método estático, la variación consiste en que el receptor denominado móvil está en constante movimiento durante el tiempo que se realiza el levantamiento, entre los métodos más conocidos se debe nombrar a método cinético y stop & go (Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 2007).
- **Método Relativo RTK (Cinemático en Tiempo Real):** Este método es conocido como Cinemático en Tiempo Real, ya que no requiere de un post-procesamiento, puesto que se incorporan los algoritmos de cálculo del software a los controladores del receptor, con ello se obtienen coordenadas en el mismo instante, para poder realizar este método es necesario que el receptor base tenga coordenadas previas conocidas, y requiere de un radio enlace para la transmisión de datos. Este método es utilizado para levantamiento en campo, replanteo, y todo tipo de labores en los cuales sea necesario el conocimiento de las coordenadas de los puntos en tiempo real. Por otro lado, como adaptación de RTK, debido a las exigencias que existen en la determinación de coordenadas precisas a través de posicionamiento GNSS, se desarrolló el método NTRIP (Network Transmit RTCM Internet Protocol). Éste es un protocolo genérico basado en transferencia de hipertexto y está diseñado para transmitir datos de corrección diferencial u otro tipo de datos GNSS a usuarios estacionarios o móviles a través de internet. Admite el acceso inalámbrico a internet a través de redes IP móviles como: GSM, GPRS, EDGE o UMTS.
- **Método Absoluto PPP (Posicionamiento del Punto Preciso):** Es una técnica de posicionamiento que toma datos de medición de un solo receptor siendo por ellos un método absoluto, al no depender de la línea base se puede obtener información independientemente de ajustes, estas soluciones se encuentran con una precisión al nivel del centímetro en modo estático o decímetro modo cinemático (Paredes, 2013). El tipo de modelos de correcciones que se obtienen a partir de esta técnica son relojes de los satélites

y órbitas precisas, junto a un esquema de modelamiento adicional de errores, correcciones de órbitas, rotación de la tierra, entre otras.

- **Precisiones de los métodos de posicionamiento**

Las precisiones de los métodos que se explicaron anteriormente se detallan en la Tabla 6.

Tabla 6
Precisiones Métodos Relativos de Posicionamiento GPS

Método	# satélites	Tiempo de observación	Precisión	Otra característica
Estático	4	De minutos a horas	5 mm + 1 ppm	Límite de 15 km para posicionamiento con una frecuencia. Sin límite para 2 frecuencias
Estático rápido	4	5-20 minutos	1 cm + 1 ppm	
Cinemático	4	2 épocas	2 cm + 2 ppm	Límite de 15 km. Reinicialización si hay pérdida de señal
RTK	4	2 épocas	2 cm + 2 ppm	Límite 19 km. Enlace por radio. Reinicialización si hay pérdida de señal

Fuente: (Dalda et al, 2008)

De lo mencionado en la Tabla 6, se considera que el método estático puede incrementar el tiempo de observación hasta como mínimo 60 minutos, para mejorar la precisión.

2.5.4 Procesamiento de Datos

2.5.4.1 Simple diferencia de fase

La simple diferencia de fase se puede realizar entre receptores o satélites. En la diferencia de fase entre receptores se pueden eliminar o reducir los efectos asociados a errores de los

relojes de satélite, se reducen enormemente los errores orbitales (si la línea base es menor a los 20000 Km) (Figura 10).

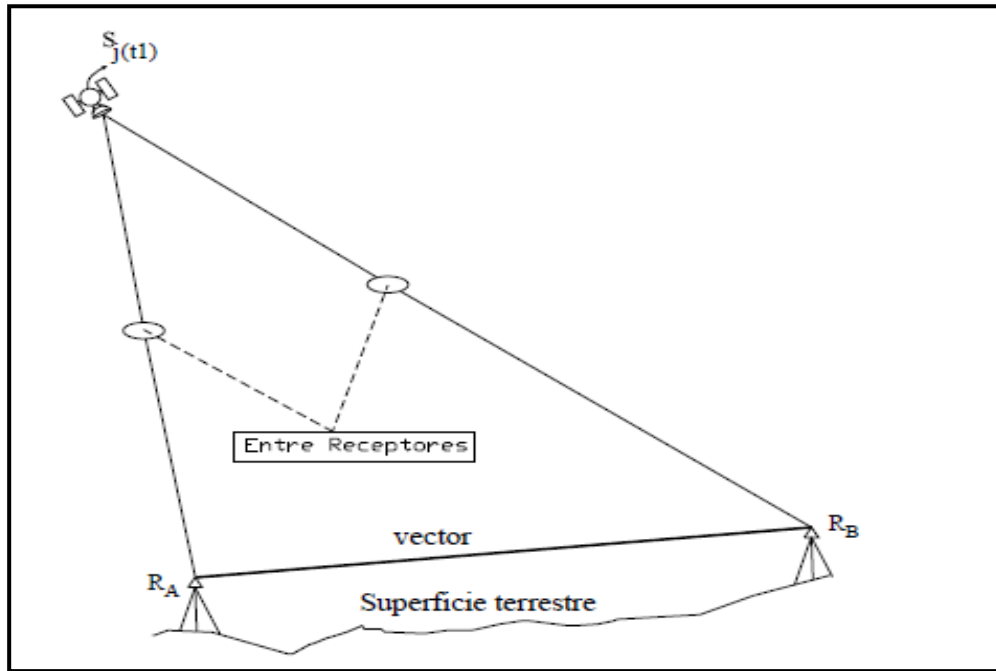


Figura 10. Simple Diferencia de Fase

Fuente: (Huerta et al, 2005)

Para una mejor explicación de lo que se realiza en una simple diferencia de fase, se utilizará las ecuaciones que maneja cada uno de los receptores.

La ecuación para el primer receptor conocido como A será:

$$\Phi_{A,j}(t) - f_i \delta_j = \frac{1}{\lambda} \rho_{A,j}(t) - N_{A,j} - f_i \delta_A(t) + f_i \Delta A_{A,j}(t) \quad (2.8)$$

Donde: Φ (observable de fase), f_i (frecuencia), δ_j (error en el satélite), λ (longitud de onda), ρ (distancia entre satélite y receptor), N (ambigüedad).

Y para el punto B:

$$\Phi_{B,j}(t) - f_i \delta_j = \frac{1}{\lambda} \rho_{B,j}(t) - N_{B,j} - f_i \delta_B(t) + f_i \Delta A_{B,j}(t) \quad (2.9)$$

El resultado de la diferencia de ecuaciones planteadas se obtiene:

$$\begin{aligned}
& [\Phi_{B,j}(t) - \Phi_{A,j}(t)] - [f_i \delta_j - f_i \delta_j] = \\
& = \frac{1}{\lambda} [\rho_{B,j}(t) - \rho_{A,j}(t)] - [N_{B,j} - N_{A,j}] - f_i [\delta_B(t) - \delta_A(t)] + f_i [\Delta A_{B,j}(t) - \Delta A_{A,j}(t)]
\end{aligned} \tag{2.10}$$

La ecuación resultante de la operación:

$$\Phi_{AB,j}(t) = \frac{1}{\lambda} \rho_{AB,j}(t) - N_{AB,j} - f_i \delta_{AB}(t) + f_i \Delta A_{AB,j}(t) \tag{2.11}$$

Donde:

$\Phi_{AB,j}(t)$: Diferencia de fase entre receptores A y B

$$\Phi_{AB,j}(t) = \Phi_{B,j}(t) - \Phi_{A,j}(t) \tag{2.12}$$

$\rho_{AB,j}(t)$: Diferencia de la distancia geométrica entre el receptor A y B

$$\rho_{AB,j}(t) = \rho_{B,j}(t) - \rho_{A,j}(t) \tag{2.13}$$

$N_{AB,j}$: Diferencia de ambigüedades de los receptores A y B.

$$N_{AB,j} = N_{B,j} - N_{A,j} \tag{2.14}$$

$\delta_{AB}(t)$: Diferencia de los errores del reloj de los receptores A y B.

$$\delta_{AB}(t) = \delta_B(t) - \delta_A(t) \tag{2.15}$$

$\Delta A_{AB,j}(t)$: Diferencia de los errores orbitales de los receptores A y B.

$$\Delta A_{AB,j} = \Delta A_{B,j}(t) - \Delta A_{A,j}(t) \quad (2.16)$$

2.5.4.2 Doble diferencia de fase

Considerando lo planteado anteriormente, una doble diferencia de fase es la resta de dos simples diferencias de fase, por ello se debe considerar que se encuentran eliminados o reducidos los errores del apartado anterior, y en este se eliminan los errores referentes al reloj de los receptores. Gráficamente, se puede apreciar en la Figura 11.

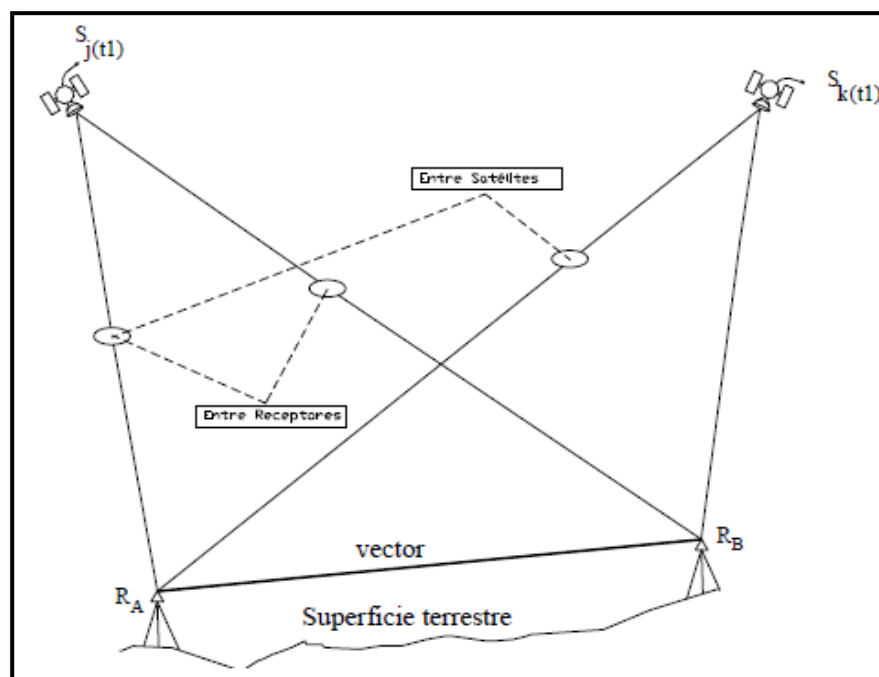


Figura 11. Doble Diferencia de Fase

Fuente: (Huerta et al, 2005)

En el caso de una doble diferencia de fase se utiliza la ecuación resultante del apartado anterior, pero ahora adaptado para dos satélites.

La ecuación para el primer satélite denominado j , es la misma anteriormente planteada en la ecuación (2.11).

Y para el segundo satélite que se denomina k :

$$\Phi_{AB,k}(t) = \frac{1}{\lambda} \rho_{AB,k}(t) - N_{AB,k} - f_k \delta_{AB}(t) + f_j \Delta A_{AB,k}(t) \quad (2.17)$$

El resultado de la diferencia de ecuaciones planteadas se obtiene:

$$\begin{aligned} & [\Phi_{AB,j}(t) - \Phi_{AB,k}(t)] = \\ & \frac{1}{\lambda} [\rho_{AB,j}(t) - \rho_{AB,k}(t)] - [N_{AB,j} - N_{AB,k}] - f_i [\delta_{AB}(t) - \delta_{AB}(t)] + \dots \\ & \dots + f_i [\Delta A_{AB,j}(t) - \Delta A_{AB,k}(t)] \end{aligned} \quad (2.18)$$

La fórmula resultante de la operación:

$$\Phi_{AB,jk}(t) = \frac{1}{\lambda} \rho_{AB,jk}(t) - N_{AB,jk} + f_i \Delta A_{AB,jk}(t) \quad (2.19)$$

Donde:

$\Phi_{AB,jk}(t)$: Diferencias de fase entre los satélites j y k.

$$\Phi_{AB,jk}(t) = \Phi_{AB,j}(t) - \Phi_{AB,k}(t) \quad (2.20)$$

$\rho_{AB,jk}(t)$: Diferencia de la distancia geométrica entre los satélites j y k.

$$\rho_{AB,jk}(t) = \rho_{AB,j}(t) - \rho_{AB,k}(t) \quad (2.21)$$

$N_{AB,jk}$: Diferencia de ambigüedades de los satélites j y k.

$$N_{AB,jk} = N_{AB,j} - N_{AB,k} \quad (2.22)$$

$\Delta A_{AB,j}(t)$: Diferencia de los errores orbitales de los satélites j y k.

$$\Delta A_{AB,j} = \Delta A_{B,j}(t) - \Delta A_{A,j}(t) \quad (2.23)$$

2.5.4.3 Triple diferencia de fase

Como se muestra en la Figura 12, no es más que la diferencia de dos dobles diferencias, considerando en una época diferente para cada una t_1 y t_2 , además se eliminan las ambigüedades.

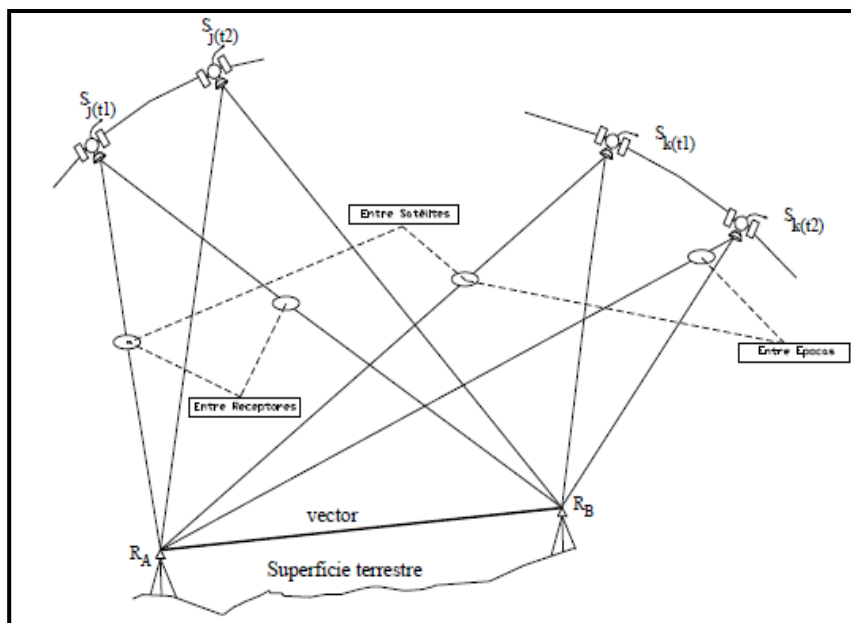


Figura 12. Triple Diferencia de Fase

Fuente: (Huerta et al, 2005)

En el caso de una triple diferencia de fase se utiliza la ecuación resultante del apartado anterior, pero ahora adaptado para dos épocas diferentes.

La ecuación para la época denominada t_1 , estará planteada:

$$\Phi_{AB,jk}(t_1) = \frac{1}{\lambda} \rho_{AB,jk}(t_1) - N_{AB,jk} + f_i \Delta A_{AB,jk}(t_1) \quad (2.24)$$

Y para la época t_2 , la ecuación es:

$$\Phi_{AB,jk}(t_2) = \frac{1}{\lambda} \rho_{AB,jk}(t_2) - N_{AB,jk} + f_i \Delta A_{AB,jk}(t_2) \quad (2.25)$$

El resultado de la diferencia de ecuaciones planteadas se obtiene:

$$\begin{aligned} & [\Phi_{AB,jk}(t_2) - \Phi_{AB,jk}(t_1)] = \\ & \frac{1}{\lambda} [\rho_{AB,jk}(t_2) - \rho_{AB,jk}(t_1)] - [N_{AB,jk} - N_{AB,jk}] + \dots \\ & \dots + f_i [\Delta A_{AB,jk}(t_2) - \Delta A_{AB,jk}(t_1)] \end{aligned} \quad (2.26)$$

La fórmula resultante de la operación:

$$\Phi_{AB,jk}(t_1 t_2) = \frac{1}{\lambda} \rho_{AB,jk}(t_1 t_2) + f_i \Delta A_{AB,k}(t_1 t_2) \quad (2.27)$$

Donde:

$\Phi_{AB,jk}(t_1 t_2)$: Diferencias de fase entre las épocas t_1 y t_2 .

$$\Phi_{AB,jk}(t_1 t_2) = \Phi_{AB,jk}(t_2) - \Phi_{AB,jk}(t_1) \quad (2.28)$$

$\rho_{AB,jk}(t_1 t_2)$: Diferencia de la distancia geométrica entre las épocas t_1 y t_2 .

$$\rho_{AB,jk}(t_1 t_2) = \rho_{AB,jk}(t_2) - \rho_{AB,jk}(t_1) \quad (2.29)$$

$\Delta A_{AB,k}(t_1 t_2)$: Diferencia de los errores orbitales entre las épocas t_1 y t_2 .

$$\Delta A_{AB,k}(t_1 t_2) = \Delta A_{AB,jk}(t_2) - \Delta A_{AB,jk}(t_1) \quad (2.30)$$

2.5.5 Errores en el posicionamiento

- **Error en los parámetros orbitales:** Este tipo de errores se produce en las estaciones de control que registran los datos de código y fase, estas son enviadas a la Estación de Control Maestro calculando aquí las posiciones orbitales de los satélites, el cálculo se lo

conoce como efemérides cuando transmiten los datos a los receptores, estas efemérides transmitidas por satélites tendrán un error asociado puesto que es imposible encontrar exactamente su posición. Para poder prevenir los errores es recomendable trabajar con las efemérides precisas de los días observados, puesto que aquí aparecen las posiciones verdaderas de los satélites, esta solución se aplica para distancias relativamente cortas entre receptores.

- **Error en el reloj del satélite:** Este error se produce por la diferencia entre el reloj del satélite respecto al tiempo GNSS, cualquier tipo de reloj incluso los atómicos producen cierto error. Este error se puede eliminar en cierto grado por las correcciones enviadas en el mensaje de navegación a cada receptor y es casi total, sin embargo, se mantiene un error de pocos nanosegundos (ns), ya que no se puede predecir exactamente la marcha del reloj satelital. Hay que tomar que en cuenta que una diferencia de 1ns en el reloj produce un error de 30 cm de distancia.
- **Disponibilidad selectiva – SA:** Es un error que se produce por una degradación intencional se la señal por parte de la Fuerza Aérea de los Estados Unidos para los usuarios civiles, actuando sobre los estados de los relojes (dither: manipulación de la frecuencia del reloj del satélite) y los parámetros orbitales (épsilon: error en las efemérides transmitidas, posición del satélite). Este tipo de errores se los puede corregir al no existir una separación considerable entre los receptores, ya que el error se lo considera similar y se lo puede eliminar.
- **Error Ionosférico:** Es uno de los errores más significativos para el posicionamiento satelital, está ubicado como su nombre lo indica, cuando la señal pasa por la ionosfera. Este error consiste en que las señales emitidas ya sea por los satélites o receptores, se hacen más lentas dependiendo de las condiciones climáticas que se presenten (Cedeño, 2015).
- **Error Troposférico:** es la capa más baja de la atmósfera llegando a una altura de 15 km sobre la superficie terrestre, en esta zona el índice de refracción varía en función de la temperatura, presión y vapor de agua. El error de refracción troposférica es independiente

de la frecuencia por ello no se puede eliminar con equipos L1 y L2. Para este tipo de errores las soluciones más frecuentes son el empleo de modelos atmosféricos como: Hopfield (1969), Saastamonien (1972), etc.

- **Error de receptor:** Existen algunos errores que se pueden presentar por parte del receptor en cualquier parte del procesamiento entre ellos el desplazamiento del centro de fase, estado del reloj receptor, incertidumbre de la medida y errores en los distintos equipos.
- **Error Multitrayectoria:** El error de multitrayectoria se produce cuando la señal no viaja directamente al receptor, sino, después de chocar en una gran superficie reflectora u obstrucción (lago, arboles, edificios, etc). Este tipo de error se puede corregir con antenas especiales de un alto costo, o realizando una planificación del levantamiento, buscando lugares alejados de las superficies descritas.

2.6 Sistemas de Referencia para Ecuador

La ley de la Cartografía en el Ecuador nombra al Instituto Geográfico Militar (IGM) como la entidad encargada de la planificación, organización, dirección, coordinación, ejecución, aprobación y control de las actividades encaminadas a la elaboración de la Cartografía Nacional y del Archivo de Datos Geográficos y Cartográficos del País (Consejo Supremo de Gobierno, 1978).

En tiempos anteriores a los sistemas de navegación por satélite no era posible utilizar un sistema geocéntrico de coordenadas por ello en su lugar su inclinación a sistemas coordinados locales que se ajustaban mejor a la forma de la tierra en un determinado lugar, como para el caso de Ecuador, se utilizaba el Dátum Provisional Sudamericano de 1956 (PSAD 56). En la actualidad, este tipo de sistemas han perdido vigencia. Ahora la determinación de un sistema de coordenadas global tiene entre sus principales ventajas la compatibilidad de información cartográfica a nivel mundial (Zurita, sf).

2.6.1 Red de Control Básico Horizontal

Según el reglamento a la Ley de la Cartografía Nacional, aprobado en 1986, el control horizontal tomaba como base el sistema PSAD 56, con su dátum o punto de origen ubicado en La Canoa, Venezuela. Este sistema utiliza como base el elipsoide Internacional de Hayford, cuyo centro presenta un desplazamiento aproximado en $DX = 288$ m, $DY = 175$ m y $DZ = -376$ m, con respecto al geocentro (Leiva, 2014).

En la actualidad, los sistemas geocéntricos de referencia son los más utilizados, esto para facilitar el intercambio de información geográfica. En el país, se adoptó el sistema SIRGAS – ECUADOR, que está materializado por la RENAGE y la REGME. La Red Nacional GPS del Ecuador (RENAGE), está compuesta de 135 vértices con coordenadas geodésicas de precisión (IGM, 2015). Esta red perdió consistencia debido al terremoto del 16 de abril de 2016, donde las estaciones debido a los movimientos sísmicos se desplazaron, por tanto ya no se utiliza como información oficial para el país.

Para evitar estos problemas, y mantener un marco geodésico de referencia consistente, se utiliza el rastreo continuo de datos GNSS (Sistema de Navegación Global por Satélite), mediante estaciones de monitoreo para considerar dentro del procesamiento la cuarta coordenada geodésica, el tiempo. Es por lo que el IGM presenta la Red GNSS de Monitoreo Continuo del Ecuador (REGME), que materializa el sistema SIRGAS – ECUADOR. A esta red la componen más de 40 estaciones de monitoreo, y sus coordenadas (ITRF08, época 2016.435) están contenidas en las fichas técnicas, información que el Instituto Geográfico Militar pone a disposición de los usuarios (Geoportal IGM, sf).

2.6.2 Red de Control Básico Vertical

En el Ecuador, según el Reglamento a la Ley de la Cartografía, el plano de referencia oficial de las alturas es considerado el nivel medio del mar, con su origen ubicado en el mareógrafo de La Libertad; a partir de este dátum, se ha materializado la Red de Control Básico Vertical del IGM, y para su determinación, se utilizaron, técnicas precisas de nivelación geométrica sin considerar observaciones gravimétricas (Cañizares, 2015), razón por la cual los circuitos de nivelación carecen de correcciones del efecto de la gravedad. Esto

conlleva a que las alturas verticales en el país sean de carácter geométrico referidas al nivel medio del mar (geoide local) (Tierra & Acurio, 2016).

En el Ecuador, el Instituto Geográfico Militar ha marcado el objetivo de establecer un sistema vertical de referencia, determinado con técnicas de nivelación de alta precisión y enlazado al dátum oficial La Libertad, para proporcionar alturas referidas al nivel medio del mar. La Red de Control Básico Vertical, se ha materializado sobre las principales vías del país, y la conforman 20 anillos, dentro de los cuales existen 57 líneas de nivelación que se encuentran enlazadas mediante 37 estaciones nodales. Además, un aproximado de 7000 puntos de densificación son los que integran esta red de aproximadamente 8000 km de longitud (IGM, 2009).c

2.7 Métodos de Nivelación

En el pasado en levantamientos topográficos, la nivelación se refería al proceso de medir, mediante métodos directos o indirectos, las distancias verticales para determinar las elevaciones. Se aplicaban dos métodos: nivelación geométrica (o directa) y nivelación trigonométrica (o indirecta). Actualmente se está incorporando la nivelación satelital, siendo este un método que optimiza recursos logísticos y financieros (Henriques & Casaca, 2016).

2.7.1 Nivelación Geométrica

Como se explicó en secciones anteriores, en la nivelación geométrica, se obtiene la diferencia de altura entre dos puntos dada por las diferencias de las lecturas a las miras colocadas sobre estos, obteniendo con ello grandes precisiones, este tipo de lecturas se realizan con un instrumento de nivelación (Henriques & Casaca, 2016). Existen dos tipos de nivelación geométrica, la simple y compuesta.

La nivelación simple consiste en determinar desniveles entre puntos mediante visuales horizontales, se determina una única posición del instrumento, debiendo cumplir con ciertos

parámetros: la diferencia de nivel entre puntos se encuentre dentro del rango de las miras, y la distancia de separación entre las miras sea tal que pueda obtenerse una buena visual.

La nivelación compuesta se utiliza cuando no se cumplen los requisitos de la nivelación simple, es decir, el nivel no permanece fijo, se necesitan realizar varias mediciones y desniveles a puntos intermedios hasta llegar al final. Para este tipo de nivelaciones se ocupan mecanismos automáticos y/o niveles electrónicos con lectura en la mira con código de barras que permite evitar los errores de lectura manual. Además le permite medir distancias para poder obtener más rápidamente las pendientes que existan entre un punto y otro. En la tabla 7, se muestran los órdenes de nivelación geométrica con sus respectivas precisiones.

Tabla 7
Órdenes de Nivelación Geométrica para el Ecuador

Orden	Precisión	Descripción
1°	$\pm(4mm\sqrt{k})$	k= distancia en kilómetros;
	$\pm(6mm\sqrt{k})$	$\pm(6mm\sqrt{k})$ repetición sección.
2°	$\pm(8.4mm\sqrt{k})$	k= distancia en kilómetros;
	$\pm(9mm\sqrt{k})$	$\pm(8.4mm\sqrt{k})$ en proyectos especiales y, $\pm(9mm\sqrt{k})$ en planos de ciudades.

Adaptado de: (IGM, 2006)

2.7.2 Nivelación Trigonométrica

La nivelación trigonométrica al igual que la geométrica busca calcular las diferencias verticales entre puntos sobre el terreno, pero ésta se basa en relaciones trigonométricas de triángulos rectángulos, tomando como insumos la medición de distancias inclinadas que los separan y el ángulo vertical que forma la distancia inclinada con un plano horizontal. La diferencia entre nivelación geométrica y la nivelación trigonométrica es considerable, por ello, la aplicación de nivelación trigonométrica se produce en lugares donde no se pueda observar las mediciones que proporciona la mira, ya sea por la distancia del nivel a ella o que el desnivel es demasiado pronunciado. Esta es una manera rápida de obtener mediciones de desniveles entre puntos (García, 1994).

2.7.3 Nivelación GPS

La nivelación GPS es un término que cubre la determinación eficiente de alturas físicas o en su defecto alturas geométricas referidas al nivel medio del mar, mediante posicionamiento GNSS (por tanto, también se puede considerar como nivelación GNSS) y la inclusión de la ondulación geoidal (Kenyeres, 2016). Debido a que la Red de Control Básico Vertical se construyó bajo la concepción de que el nivel medio del mar coincide en un punto (dátum vertical) con el geoide, en este estudio se acogerá la hipótesis de que estas dos superficies son similares, por tanto las respectivas alturas son equivalentes ($H^n \cong H$) (ver Figura 13).

Este método es asequible para aplicaciones, donde la precisión de centímetros es suficiente o para regiones donde la infraestructura de referencia de altura no está disponible. Existe, así también, limitaciones para el método nivelación GPS, que se relacionan con la sensibilidad del tipo de observaciones satelitales ya que se debe considerar las circunstancias ambientales, incluido el estado de la ionosfera/troposfera, los trayectos múltiples y los objetos de bloqueo de señales; por lo tanto, se debe prestar especial atención a la selección del sitio y las mediciones GNSS (Kenyeres, 2016).

El modelo matemático sobre el cual se basa el método de nivelación GPS, se desarrolla a continuación.

Sean dos puntos P y Q, donde Q tiene altura nivelada conocida (ver Figura 13), a partir de las ecuaciones (2.31) y (2.32), se puede calcular la altura sobre el nivel medio del mar, para cada punto, formando un sistema de ecuaciones.

$$H_P^n = h_P - \eta_P \quad (2.31)$$

$$H_Q^n = h_Q - \eta_Q \quad (2.32)$$

Donde:

H_Q^n : Altura nivelada del punto Q (punto base)

η_Q : Ondulación geoidal del punto Q (punto base)

h_Q : Altura elipsoidal del punto Q (punto base)

H_P^n : Altura nivelada del punto P (punto móvil)

η_P : Ondulación geoidal del punto P (punto móvil)

h_P : Altura elipsoidal del punto P (punto móvil)

Se obtiene la diferencia de estas dos ecuaciones:

$$H_P^n - H_Q^n = h_P - h_Q - \eta_P + \eta_Q \quad (2.33)$$

Despejando la altura nivelada del punto P, se obtiene la ecuación base del método de nivelación GPS.

$$H_P^n = H_Q^n + (h_P - h_Q) - (\eta_P - \eta_Q) \quad (2.34)$$

La altura nivelada del punto Q es obtenida en los datos geodésicos entregados por el IGM, las alturas elipsoidales son determinadas en campo mediante el posicionamiento GPS, y las ondulaciones geoidales en este estudio se obtienen a partir del modelo EGM08. En la Figura 13, se muestran las superficies que se utilizan y las respectivas alturas para el desarrollo de este método.

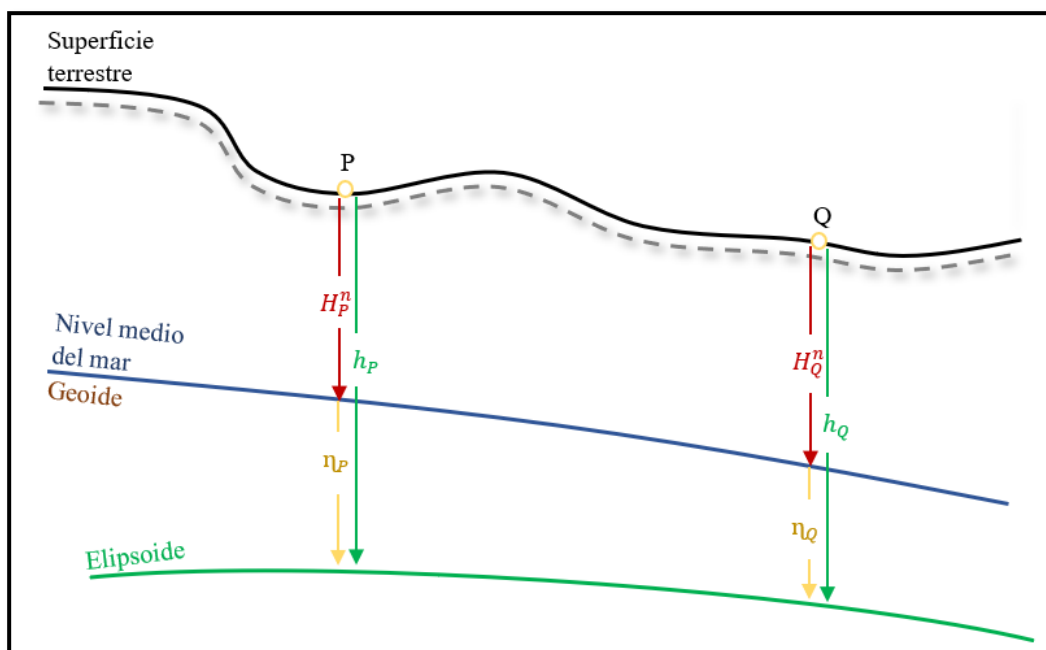


Figura 13. Nivelación GPS

Adaptado de: (Sánchez, 2002)

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

3.1 Recopilación de datos

En el desarrollo de esta investigación se utilizaron los siguientes insumos: Modelo EGM08 mediante el cual se puede conocer el valor de la ondulación geoidal de cualquier punto sobre la superficie terrestre; perfil del Ecuador continental, Red de Control Básico Vertical del Ecuador y monografías de placas de nivelación.

3.1.1 Modelo EGM08

Para obtener los datos de ondulaciones geoidales, se utilizaron 2 archivos y una aplicación descargados de la página oficial de la NGA (U.S. National Geospatial-Intelligence Agency): <http://earth-info.nga.mil>, los archivos mencionados son:

- Tide Free Spherical Harmonic Coefficients (Archivo: EGM2008_to2190_TideFree)
- Correction Model (Archivo: Zeta-to-N_to2160_egm2008)
- hsynth_WGS84.f (Aplicación: hsynth_WGS84.exe)

La ondulación geoidal se obtiene en base a una grilla de un minuto de arco de resolución, del territorio con coordenadas de latitud y longitud referidas al WGS84. Esta información, inicialmente estuvo contenida en un archivo INPUT.DAT y mediante la aplicación antes mencionadas se realizó el respectivo cálculo. El archivo resultante llamado OUTPUT.DAT, contiene los datos de ondulaciones geoidales de la grilla generada. Un ejemplo de los archivos mencionados se visualiza en la Figura 14.

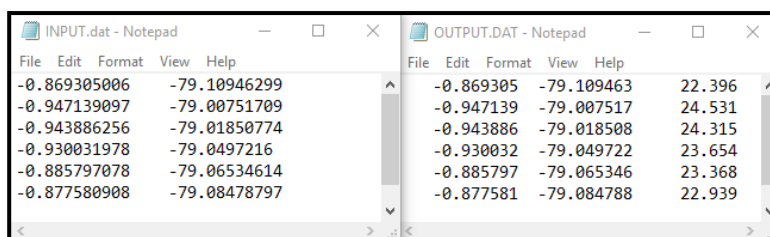


Figura 14. Muestra de archivos INPUT y OUTPUT, EGM08

3.1.2 Perfil del Ecuador continental

Este insumo en formato shape, fue obtenido del geoportal del IGM de Ecuador (www.geoportaligm.gob.ec), bajo la Licencia de Acceso y Uso Libre de la Información Geográfica Digital.

El modelo obtenido en la sección 3.1.1 se exportó en un SIG considerando el perfil del Ecuador continental (Figura 15). En el Anexo 1 se presenta este modelo en formato ráster.

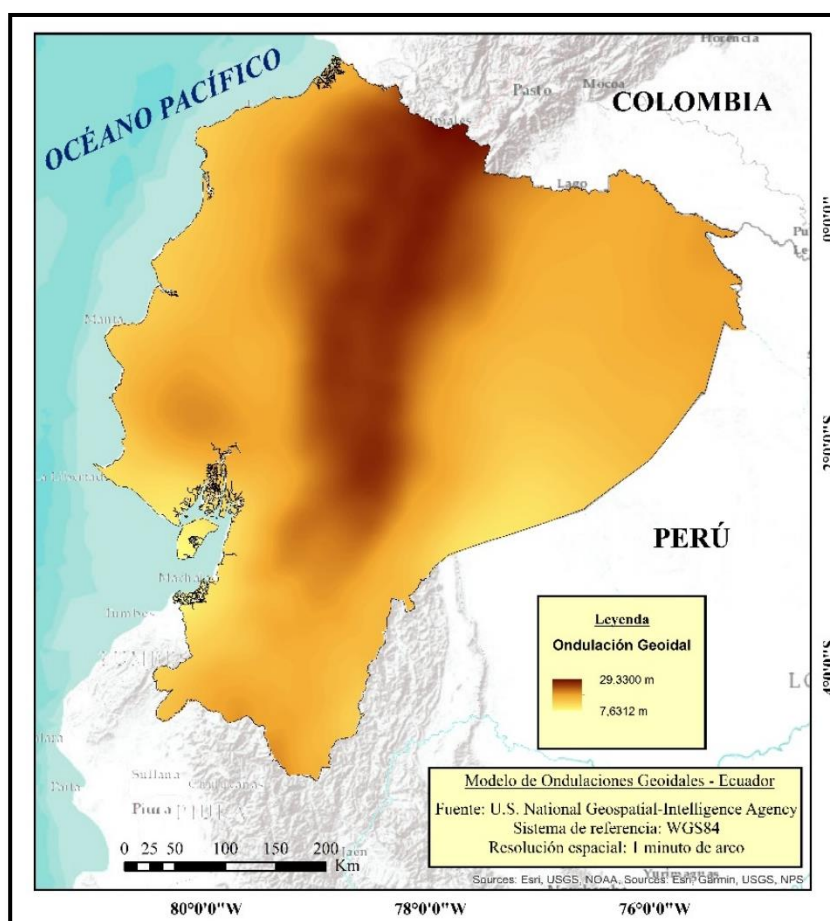


Figura 15. Modelo Ondulación Geoidal EGM08

Fuente: (NGA, 2013)

3.1.3 Red de Control Básico Vertical

Este insumo en formato shape, fue obtenido del geoportal del IGM de Ecuador (www.geoportaligm.gob.ec), bajo la Licencia de Acceso y Uso Libre de la Información Geográfica Digital.

Las líneas de la RCBV se muestran en la Figura 16. Esta red está conformada por 33 anillos de nivelación con una longitud mayor a 8000 km, que se extiende por las principales carreteras del país.



Figura 16. Red de Líneas de Nivelación - Ecuador

Fuente: Datos Geodésicos del IGM

3.3 Zonificación del gradiente de ondulación geoidal

Para esta zonificación o clasificación de los valores de gradiente de ondulación geoidal, se utilizó el método de Quiebres Naturales (Natural Breaks) que se basa en el algoritmo de optimización de Jenks. Este método es utilizado para clasificar los datos según su similitud en diferentes clases de acuerdo con los quiebres naturales (breakpoints) (Jiang, 2013).

De acuerdo con los valores que presenta el modelo de gradiente de ondulación geoidal, cuya variación va de los 0.0001 – 0.2412 ppm, se ha considerado adaptar para esta investigación, la cantidad de clases que presenta Oropeza (2010), quien indica 5 categorías para la variación con respecto a la pendiente. Esto se muestra en la Tabla 8. Y, gráficamente, en la Figura 18.

Tabla 8
Zonas de Variación de Ondulación Geoidal

Zona de variación (gradiente)	Descripción	Intervalo (ppm)
1	Baja	0.0001 – 0.0379
2	Ligeramente suave	0.0380 – 0.0739
3	Suave	0.0740 – 0.1126
4	Moderada	0.1127 – 0.1608
5	Fuerte	0.1609 – 0.2412

Adaptado de: (Oropeza, 2010)

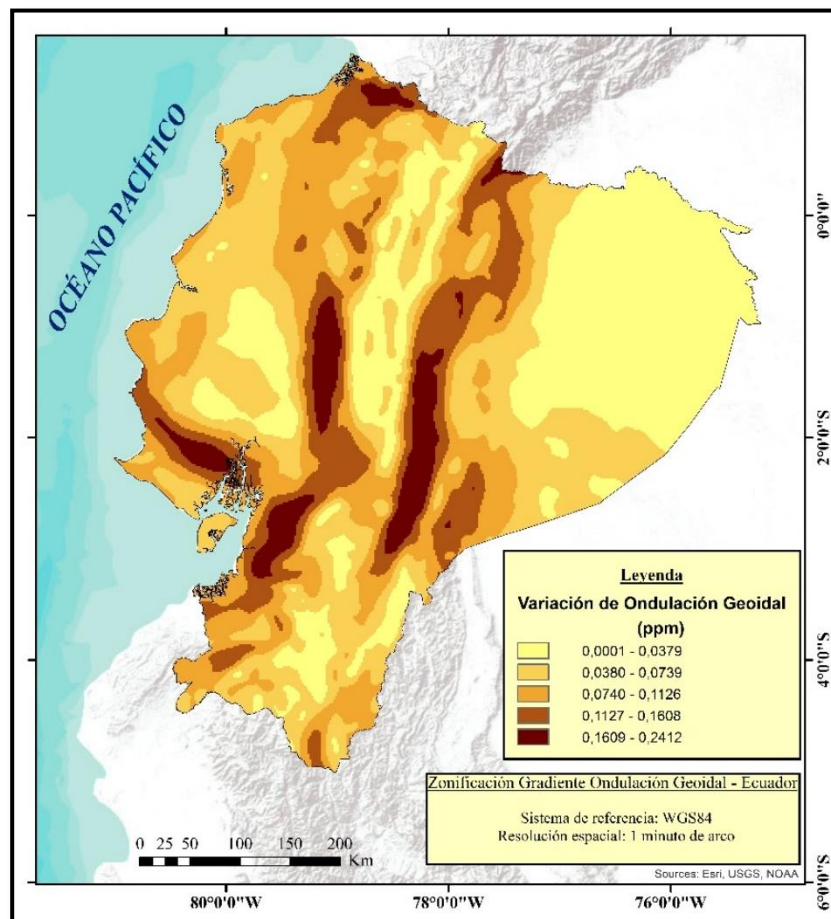


Figura 18. Mapa Zonificación Gradiente Ondulación Geoidal

3.4 Plan de muestreo de Red de Control Básico Vertical del IGM

3.4.1 Selección de líneas de nivelación

La selección de las líneas de nivelación a muestrear se realizó intersecando el mapa de zonificación de gradiente de ondulación geoidal y las líneas de RCBV, como se muestra en la Figura 19.

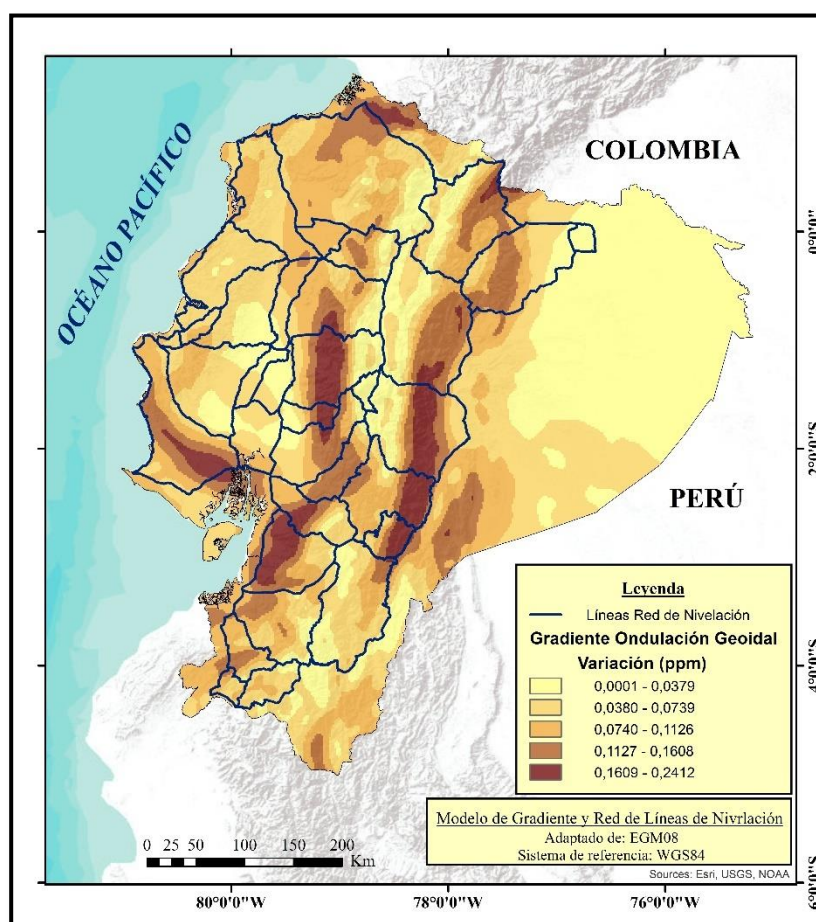


Figura 19. Intersección Mapa de Gradiente y RCBV

En base al mapa de intersección, se seleccionaron 2 líneas por cada una de las zonas. En la Tabla 9, se muestran las líneas correspondientes a cada zona.

Tabla 9

Intersección Líneas de Nivelación y Mapa de Gradiente

Zona de variación	Anillo	Línea	Ubicación
1	XXXI	L1	Baños – Ambato
	IX	L3	Quito – Latacunga
2	II	L5	Manta – Montecristi
	XXVIII	L2	Puyo – Macas
3	XXIX	L1	Cuyuja – Baeza
	X	L2	Alóag – Santo Domingo
4	I	L1	Puerto López – La Libertad
	XVIII	L2	Pallatanga – El Triunfo
5	IX	L4	Latacunga – Quevedo
	I	L5	Guayaquil - Santa Elena

De estas líneas, se eligió una por cada zona para realizar el muestreo de placas de nivelación. Además, se eligió una línea de verificación para la zona 1, ya que la línea analizada inicialmente (Quito - Latacunga) no presentaba las placas y los parámetros necesarios para realizar nivelación GPS, por tanto, se debió verificar el error que esta presentó. Las líneas seleccionadas se detallan en la Tabla 10 y gráficamente se muestran en la Figura 20.

Tabla 10
Líneas de Nivelación Seleccionadas

Zona de variación	Anillo	Línea	Ubicación
1	IX	L3	Quito - Latacunga
2	II	L5	Manta – Montecristi
3	XXIX	L1	Cuyuja – Baeza
4	I	L1	Puerto López – La Libertad
5	IX	L4	Latacunga – Quevedo
1 (verificación)	XXXI	L1	Ambato – Baños

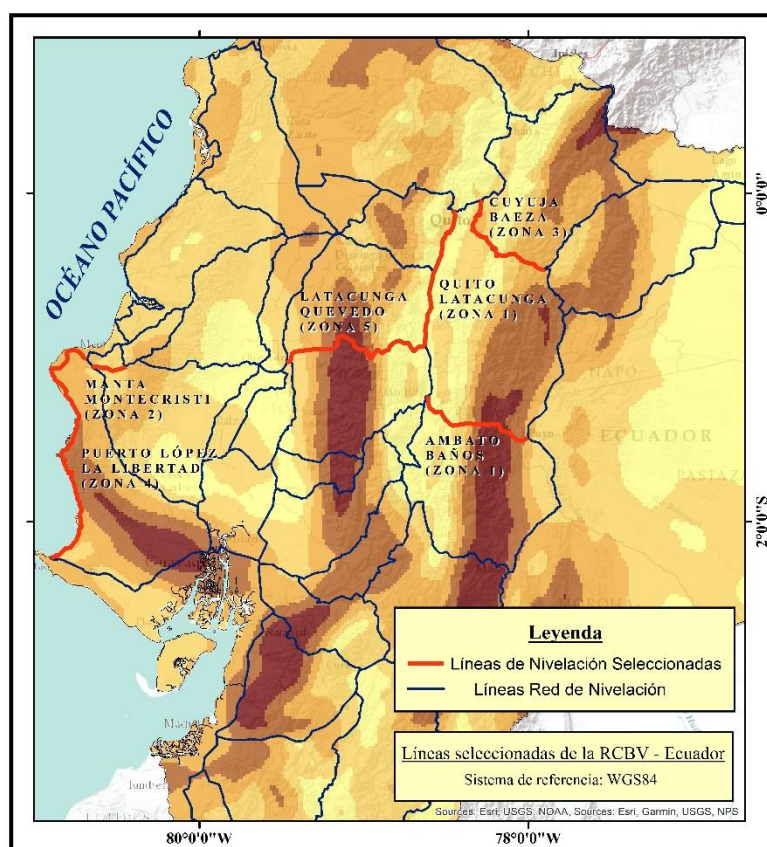


Figura 20. Selección Líneas de Nivelación

3.4.2 Muestreo de placas de nivelación

De las líneas que se muestran en la Tabla 9, se solicitó al Instituto Geográfico Militar (IGM) las monografías de ubicación de las placas de nivelación. Con estos datos se procedió a la fase de reconocimiento de existencia de placas en campo por una distancia de 20 kilómetros. Las monografías utilizadas en esta sección, además de la evidencia del reconocimiento en campo (fotografías), se presentan en el Anexo 3.

De las placas reconocidas en campo, se seleccionaron las que presentan mejores características, a partir de las siguientes consideraciones:

- Placa base: se encuentre ubicada sobre terreno firme y libre de obstrucciones, siendo este un sitio seguro, no en lugares desolados, alejado de carreteras y de preferencia dentro de instalaciones como parques, parqueaderos, gasolineras, etc.
- Placas móviles: se encuentren sobre terreno firme, seguro y libre de obstrucciones, que existan placas hasta una distancia aproximada de 15 kilómetros de la placa base.

3.4.2.1 Muestreo de placas zona 1: Línea Quito – Latacunga

Para esta línea se definió una placa base (IX-L3-15A) y a partir de esta se determinaron 4 placas móviles a diferentes distancias. Esta información se muestra en la Tabla 11.

Tabla 11
Placas Seleccionadas Línea Quito – Latacunga

Nombre	Identificación	Distancia (km)
IX-L3-15A	BASE	
IX-L3-17A	MÓVIL	3.42
IX-L3-17B	MÓVIL	4.59
IX-L3-21A	MÓVIL	5.32
IX-L3-5A-AJ	MÓVIL	16.8

La ubicación de estas placas sobre el mapa de zonificación de gradiente de ondulación geoidal, se muestra en la Figura 21.

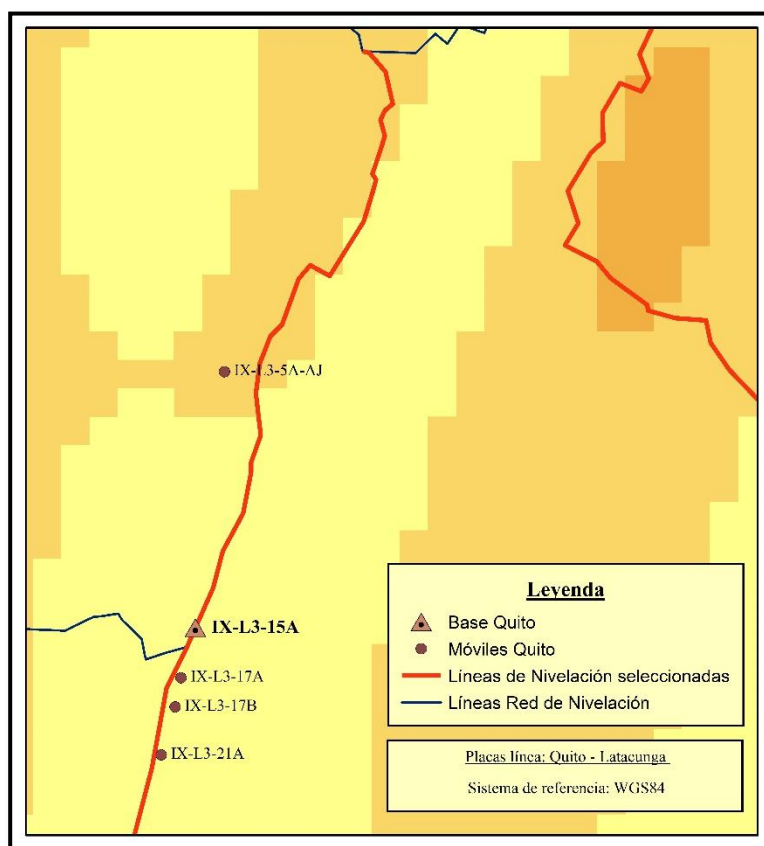


Figura 21. Placas Línea Quito – Latacunga

3.4.2.2 Muestreo de placas zona 2: Línea Manta – Montecristi

Para esta línea se definió una placa base (M-Q-10-A-AJ) y a partir de esta se determinaron 7 placas móviles a diferentes distancias. Esto se muestra en la Tabla 12.

Tabla 12
Placas Seleccionadas Línea Manta – Montecristi

Nombre	Identificación	Distancia (km)
M-Q-10-A-AJ	BASE	
II-L58-16	MÓVIL	0.83
II-L58-14	MÓVIL	3.06
II-L58-12	MÓVIL	6.31
II-L58-11	MÓVIL	8.16
II-L58-10	MÓVIL	9.73
II-L58-8	MÓVIL	12.62
II-L58-7	MÓVIL	13.97

La ubicación de estas placas sobre el mapa de zonificación de gradiente de ondulación geoidal, se muestra en la Figura 22.

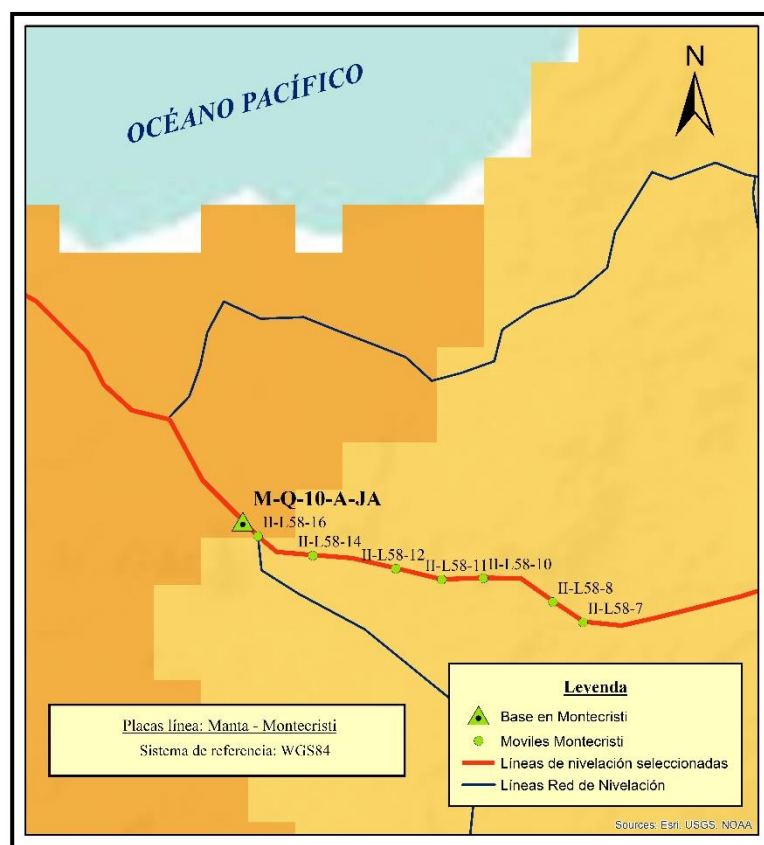


Figura 22. Placas Línea Manta – Montecristi

3.4.2.3 Muestreo de placas zona 3: Línea Cuyuja – Baeza

Para esta línea se definió una placa base (XXIX-L1-56A) y a partir de esta se determinaron 5 placas móviles a diferentes distancias. Esta información se muestra en la Tabla 13.

Tabla 13

Placas Seleccionadas Línea Cuyuja - Baeza

Nombre	Identificación	Distancia (km)
XXIX-L1-56A	BASE	
XXIX-L2-2A	MÓVIL	3.80
XXIX-L1-54C	MÓVIL	4.75
XXIX-L1-51A	MÓVIL	9.25
XXIX-L1-50A	MÓVIL	10.68

XXIX-L1-48C	MÓVIL	13.31
--------------------	--------------	--------------

La ubicación de estas placas sobre el mapa de zonificación de gradiente de ondulación geoidal, se muestra en la Figura 23.

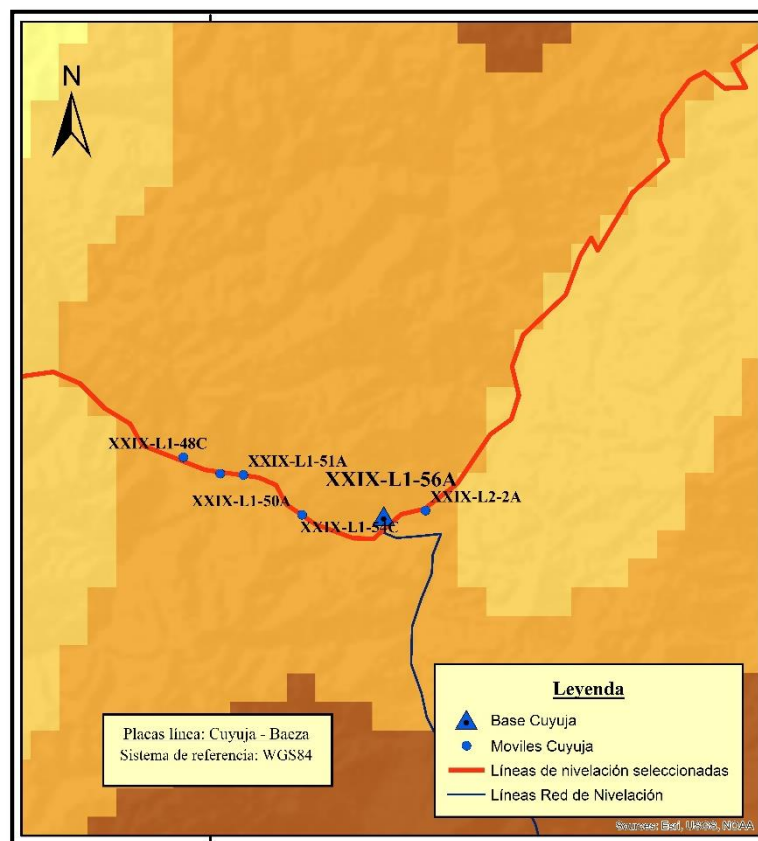


Figura 23. Placas Línea Cuyuja – Baeza

3.4.2.4 Muestreo de placas zona 4: Línea Puerto López – La Libertad

Para esta línea se definió una placa base (J-PL-5B) y a partir de esta se determinaron 4 placas móviles a diferentes distancias. Esta información se muestra en la Tabla 14.

Tabla 14
Placas Seleccionadas Línea Puerto López – La Libertad

Nombre	Identificación	Distancia (km)
J-PL-5B	BASE	
J-PL-4B	MÓVIL	2.95
L-M-70	MÓVIL	5.85
L-M-66	MÓVIL	8.99
L-M-64	MÓVIL	13.19

La ubicación de estas placas sobre el mapa de zonificación de gradiente de ondulación geoidal, se muestra en la Figura 24.

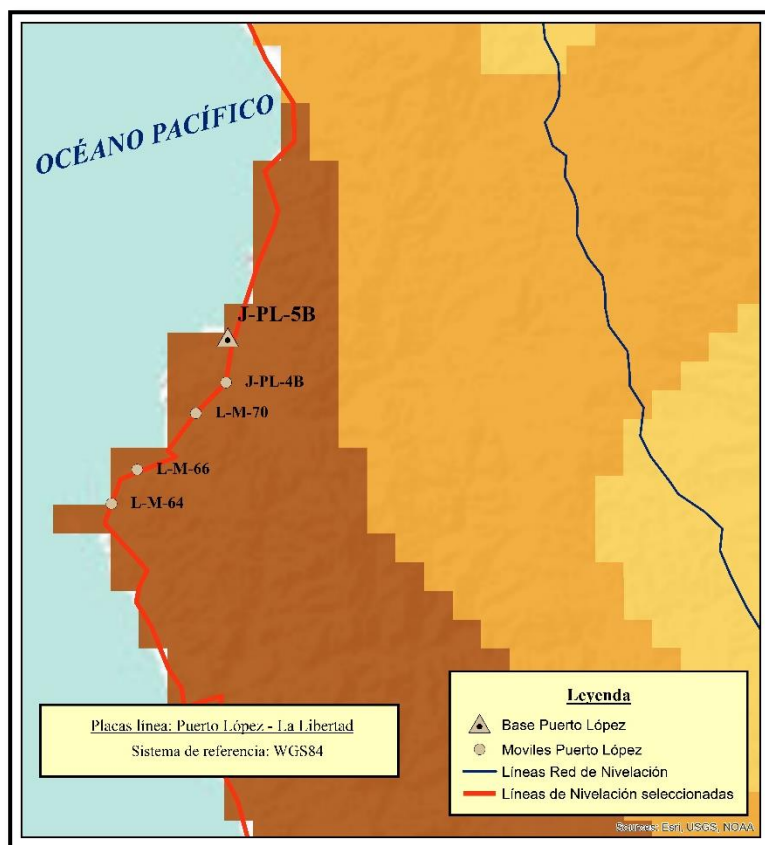


Figura 24. Placas Línea Puerto López - La Libertad

3.4.2.5 Muestreo de placas zona 5: Línea Latacunga – Quevedo

Para esta línea se definió una placa base (IX-L4-90A) y a partir de esta se determinaron 5 placas móviles a diferentes distancias. Esto se muestra en la Tabla 15.

Tabla 15
Placas Seleccionadas Línea Latacunga - Quevedo

Nombre	Identificación	Distancia (km)
IX-L4-90A	BASE	
IX-L4-88A	MÓVIL	2.90
IX-L4-86A	MÓVIL	5.24
IX-L4-80A	MÓVIL	9.45
IX-L4-76A	MÓVIL	13.06
IX-L4-74A	MÓVIL	14.24

La ubicación de estos puntos sobre el mapa de zonificación de gradiente de ondulación geoidal, se muestra en la Figura 25.

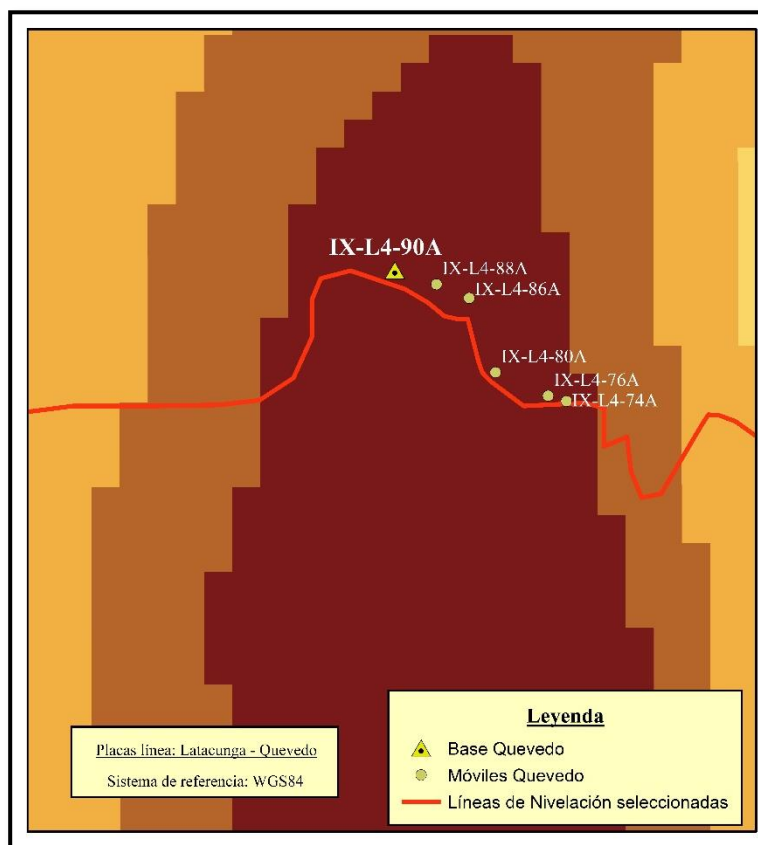


Figura 25. Placas Línea Latacunga – Quevedo

3.4.2.6 Muestreo de placas zona 1: Línea Ambato – Baños (Verificación)

Para esta línea se definió una placa base (A-B-11B) y a partir de esta se determinaron 5 placas móviles a diferentes distancias. Esta información se muestra en la Tabla 16.

Tabla 16

Placas Seleccionadas Línea Ambato – Baños

Nombre	Identificación	Distancia (km)
A-B-11B	BASE	
A-B-15	MÓVIL	4.62
XXXI-L1-9B	MÓVIL	6.50
XXXI-L1-12A	MÓVIL	9.14
XXXI-L1-16A	MÓVIL	13.42
XXXI-L1-18A	MÓVIL	15.17

La ubicación de estos puntos sobre el mapa de zonificación de gradiente de ondulación geoidal, se muestra en la Figura 26.

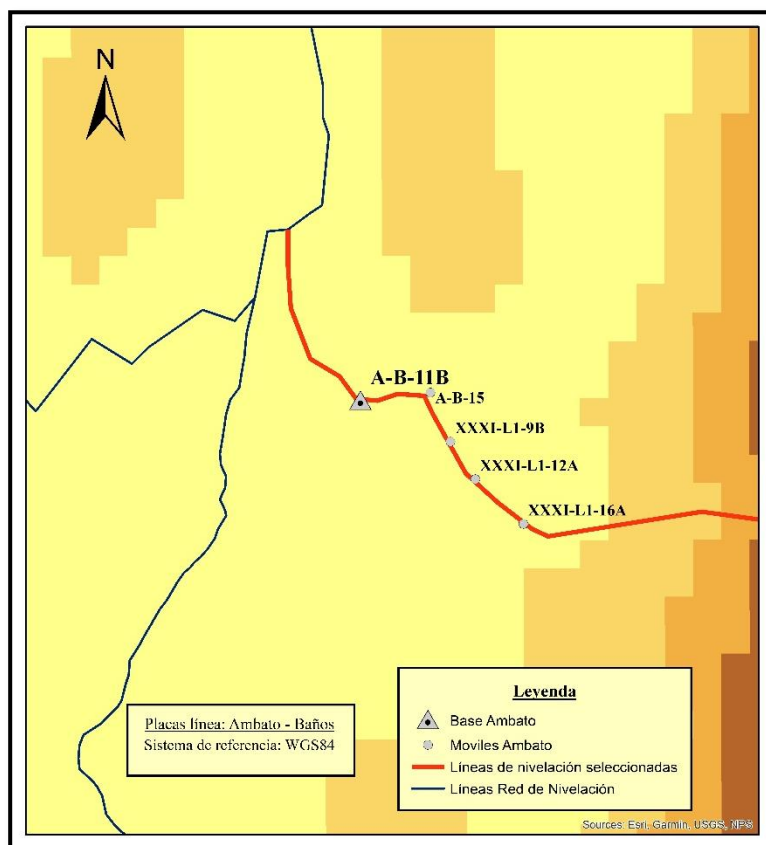


Figura 26. Placas Línea Ambato – Baños

3.5 Posicionamiento GPS

Las placas de nivelación seleccionadas en el plan de muestreo fueron posicionadas con GPS de precisión. Se utilizaron los siguientes parámetros para realizar el rastreo satelital: razón de grabación de 5 segundos, máscara de elevación de 10 grados, tiempo de ocupación de 1 hora, simple y doble frecuencia, PDOP máximo de 7, y dependiendo del caso altura vertical o inclinada.

Los equipos utilizados fueron: GNSS Trimble R4 doble frecuencia (ver Figura 27), y GPS Trimble R3 una frecuencia (ver Figura 28). Para la placa base se utilizó el método estático y para los móviles el método estático rápido.



Figura 27. Equipo GNSS Trimble R4



Figura 28. Equipo GPS Trimble R3

El posicionamiento de las líneas de nivelación se lo realizó en tres salidas de campo. La primera salida de campo correspondió a la provincia de Manabí, la segunda a la provincia de Cotopaxi y la final a las provincias de Napo y Tungurahua. De todos estos trabajos de campo, se presenta una memoria técnica en el Anexo 4.

En la salida de campo a la provincia de Manabí, se analizaron dos líneas de nivelación pertenecientes a la Red de Control Básico Vertical, la primera fue la línea Manta – Montecristi, con un total de 8 placas analizadas. La segunda correspondió a la línea Puerto López – La Libertad, con 5 placas analizadas. Esta salida se realizó en el mes de junio entre los días 18 y 22.

En la salida de campo a la provincia de Cotopaxi, se analizaron dos líneas de nivelación pertenecientes a la RCBV, la primera fue la línea Latacunga - Quevedo, con un total de 6 placas analizadas. La segunda correspondió a la línea Quito - Latacunga, con 5 placas analizadas. Esta salida se realizó en el mes de octubre entre los días 4 y 5.

En la salida de campo a las provincias de Napo y Tungurahua, se analizaron dos líneas de nivelación, la primera fue la línea Cuyuja – Baeza, con un total de 6 placas analizadas. La segunda correspondió a la línea Ambato – Baños, con 6 placas analizadas. Esta salida se realizó en el mes de noviembre entre los días 01 y 02.

3.6 Procesamiento de datos GPS

Para el procesamiento de los datos GPS, se utilizó el software Trimble Business Center (TBC) 2.99, aplicando los parámetros para la configuración que se detallan en la Tabla 17.

Tabla 17
Parámetros para Configuración Procesamiento TBC

Proyección:	UTM, Zona 17 Sur		
Máscara de elevación:	15°		
Intervalo de procesamiento:	5 segundos		
Tipo de efeméride:	Precisa		
Control de calidad del procesamiento:	Indicador (m)	Fallida (m)	
	H_z	0.005 + 1 ppm	0.010 + 2 ppm
	V_r	0.010 + 2 ppm	0.020 + 4 ppm
Satélites:	GPS + GLONASS		

El procesamiento de cada línea tuvo dos fases, la primera corresponde a la placa base, enlazando a la REGME, y la segunda corresponde a los móviles enlazando a la placa base. Si en alguna de estas fases no se cumplía con los parámetros de calidad presentados en la Tabla 17 se descartaba el punto en cuestión. Los informes derivados del procesamiento de cada punto, por cada línea de nivelación, se presentan en el Anexo 5.

3.6.1 Procesamiento Línea Quito – Latacunga

3.6.1.1 Procesamiento placa base IX – L3 – 15A

Los datos utilizados para procesar las coordenadas de esta base fueron: archivo crudo (37862780.T01), 2 Estaciones de Monitoreo Continuo (CXEC278a.T02 y EPEC278a.T02) y efemérides precisas (igs20215.sp3). Se procesaron las líneas base, y se obtuvieron las coordenadas que se detallan en la Tabla 18. El esquema de procesamiento se muestra en la Figura 29.

Tabla 18
Coordenadas Placa Base Línea Quito - Latacunga

Placa	UTM		Altura elipsoidal (m)	Precisiones		
	Este (m)	Norte (m)		σE	σN	σh
IX-L3-15A	771647.298	9950146.866	2804.9578	0.010	0.005	0.026

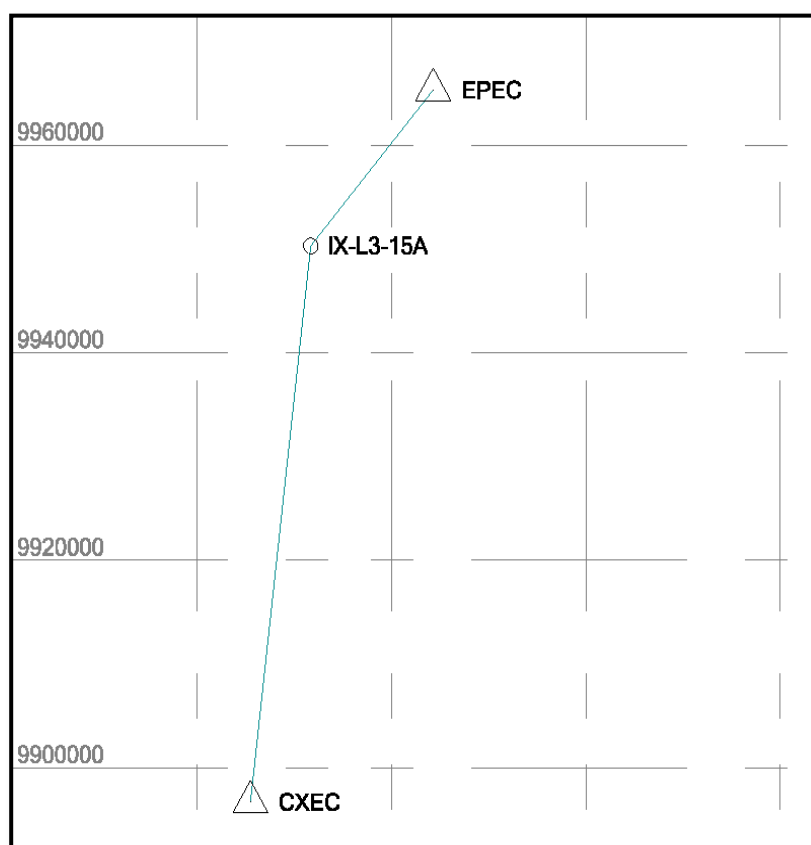


Figura 29. Esquema Procesamiento IX-L3-15A

3.6.1.2 Procesamiento placas móviles

Se fijaron las coordenadas de la placa base (IX-L3-15A) a partir de la información que se muestra en la Tabla 18, y se procesaron las líneas base de todos los móviles. En la Tabla 19 se presentan los resultados del procesamiento de las placas móviles.

Tabla 19
Coordenadas Placas Móviles Línea Quito - Latacunga

Placa	UTM		Altura elipsoidal (m)	Precisiones		
	Este (m)	Norte (m)		σE	σN	σh
IX-L3-17A	770681.965	9946865.71	2884.7973	0.017	0.013	0.041
IX-L3-17B	770283.323	9944965.02	2945.8779	0.010	0.006	0.027
IX-L3-21A	769393.857	9941823.9	3028.0022	0.011	0.006	0.028
IX-L3-5A-AJ	773550.195	9966877.41	2929.6316	0.010	0.005	0.027

3.6.2 Procesamiento Línea Manta – Montecristi

3.6.2.1 Procesamiento placa base M-Q-10-A-JA

Los datos utilizados para procesar esta placa base fueron: archivo crudo (28421701.T02), 1 Estación de Monitoreo Continuo (POEC170a.T02) y efemérides precisas (igs20062.sp3). Se procesó la línea base, y se obtuvieron las coordenadas que se detallan en la Tabla 20. El esquema de procesamiento se muestra en la Figura 30.

Tabla 20
Coordenadas Placa Base Línea Manta – Montecristi

Placa	UTM		Altura elipsoidal (m)	Precisiones		
	Este (m)	Norte (m)		σE	σN	σh
M-Q-10-A-JA	537776.943	9884670.65	135.3942	0.004	0.003	0.009

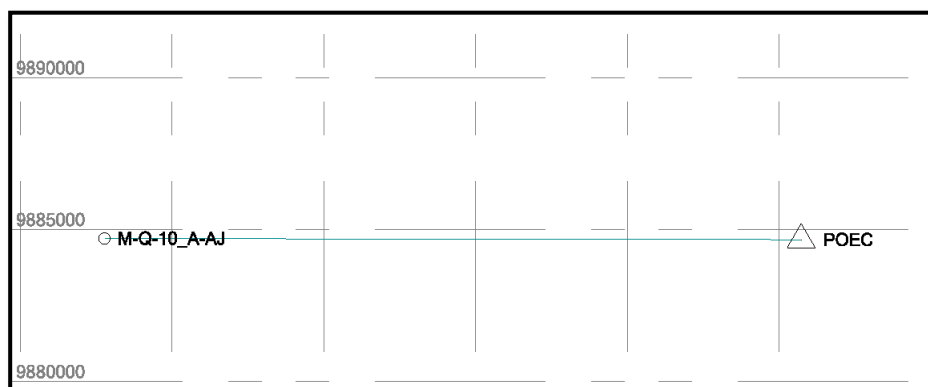


Figura 30. Esquema Procesamiento M-Q-10-A-JA

3.6.2.2 Procesamiento placas móviles

Se fijaron las coordenadas de la placa base (M-Q-10-A-JA) a partir de la información que se muestra en la Tabla 20, y se procesaron las líneas base de todos los móviles. En la Tabla 21, se presentan los resultados del procesamiento de las placas móviles.

Tabla 21
Coordenadas Placas Móviles Línea Manta – Montecristi

Placa	UTM		Altura elipsoidal (m)	Precisiones		
	Este (m)	Norte (m)		σE	σN	σh
II-L58-16	538374.098	9884091.2080	128.7873	0.005	0.004	0.011
II-L58-14	540531.176	9883331.357	146.8851	0.004	0.003	0.009
II-L58-12	543806.302	9882817.211	200.0997	0.004	0.004	0.010
II-L58-11	545610.779	9882396.006	238.5228	0.004	0.004	0.010
II-L58-10	547251.071	9882444.682	292.616	0.005	0.004	0.010
II-L58-8	549995.12	9881515.182	164.665	0.005	0.004	0.010
II-L58-7	551178.649	9880719.117	126.573	0.006	0.005	0.014

3.6.3 Procesamiento Línea Cuyuja – Baeza

3.6.3.1 Procesamiento placa base XXIX-L1-56A

Los datos utilizados para procesar las coordenadas de esta base fueron: archivo crudo (37863051.T01), 2 Estaciones de Monitoreo Continuo (CHEC305a.T02 y EPEC305a.T02) y efemérides precisas (igs20254.sp3). Se procesaron las líneas base, y se obtuvieron las coordenadas que se detallan en la Tabla 22. El esquema de procesamiento se muestra en la Figura 31.

Tabla 22
Coordenadas Placa Base Línea Cuyuja – Baeza

Placa	UTM		Altura elipsoidal (m)	Precisiones		
	Este (m)	Norte (m)		σE	σN	σh
XXIX-L1-56A	844537.082	9948826.207	1846.7662	0.010	0.005	0.026

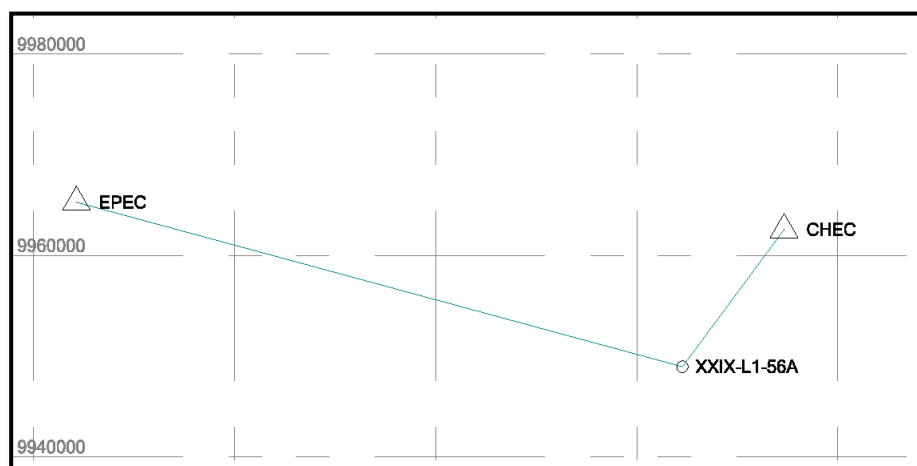


Figura 31. Esquema Procesamiento XXIX-L1-56A

3.6.3.2 Procesamiento placas móviles

Se fijaron las coordenadas de la placa base (XXIX-L1-56A) a partir de la información que se muestra en la Tabla 22, y se procesaron las líneas base de todos los móviles. En la Tabla 23, se presentan los resultados del procesamiento de las placas móviles.

Tabla 23

Coordenadas Placas Móviles Línea Cuyuja – Baeza

Placa	UTM		Altura elipsoidal (m)	Precisiones		
	Este (m)	Norte (m)		σE	σN	σh
XXIX-L2-2A	848012.672	9950353.0898	1871.6275	0.010	0.006	0.028
XXIX-L1-54C	839958.825	9950077.5742	1960.6004	0.012	0.006	0.027
XXIX-L1-51A	836122.563	9952672.4627	2244.8889	0.011	0.008	0.029
XXIX-L1-50A	834608.903	9952752.72	2334.119	0.015	0.011	0.041
XXIX-L1-48C	832203.675	9953821.113	2392.9281	0.011	0.007	0.031

El punto XXIX-L1-50A, no cumplió con los parámetros de calidad definidos en la Tabla 23. Esto se debe a las características del lugar donde se encontraba el punto, al filo de carretera, y al pie de monte, lo que ocasionaba obstrucciones e interferencias. Este punto se descartó para posteriores análisis.

3.6.4 Procesamiento Línea Puerto López – La Libertad

3.6.4.1 Procesamiento placa base J-PL-5B

Los datos utilizados para procesar las coordenadas de esta base fueron: archivo crudo (28421721.T02), 1 Estación de Monitoreo Continuo (POEC172a.T02) y efemérides precisas (igs20064.sp3). Se procesó la línea base, obteniendo las coordenadas que se detallan en la Tabla 24. El esquema de procesamiento se muestra en la Figura 32.

Tabla 24

Coordenadas Placa Base Línea Puerto López – La Libertad

Placa	UTM		Altura elipsoidal (m)	Precisiones		
	Este (m)	Norte (m)		σE	σN	Σh
J-PL-5B	525219.053	9835465.527	50.1204	0.004	0.004	0.008

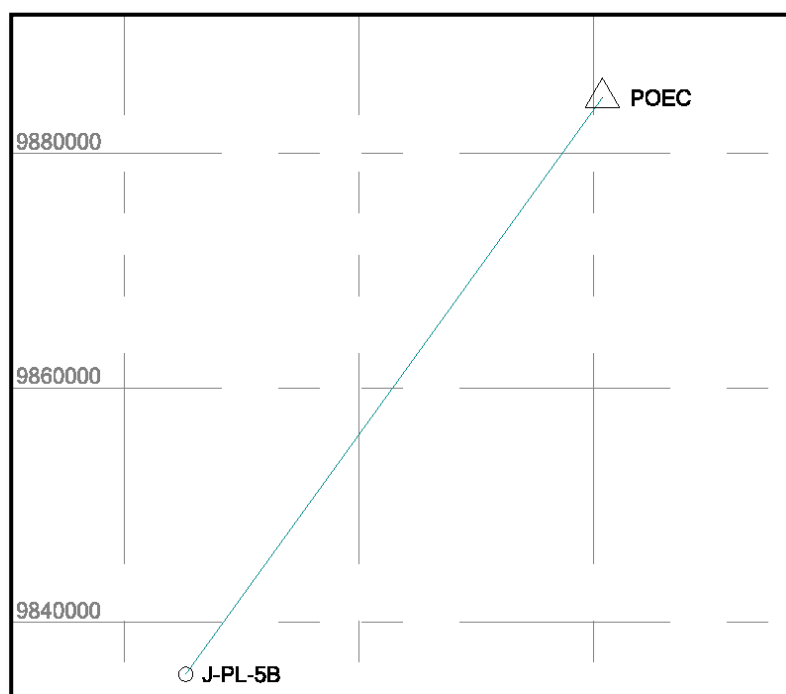


Figura 32. Esquema Procesamiento J-PL-5B

3.6.4.2 Procesamiento placas móviles

Se fijaron las coordenadas de la placa base (J-PL-5B) a partir de la información que se muestra en la Tabla 24, y se procesaron las líneas base de todos los móviles. En la Tabla 25 se presentan los resultados del procesamiento de las placas móviles.

Tabla 25

Coordenadas Placas Móviles Línea Puerto López – La Libertad

Placa	UTM		Altura elipsoidal (m)	Precisiones		
	Este (m)	Norte (m)		σE	σN	σh
J-PL-4B	525104.187	9832520.6960	44.3655	0.004	0.004	0.009
L-M-70	523135.326	9830534.931	29.9988	0.005	0.006	0.011
L-M-66	519319.968	9826881.518	115.0992	0.005	0.004	0.009
L-M-64	517643.193	9824670.138	21.2341	0.004	0.004	0.009

3.6.5 Procesamiento Línea Latacunga - Quevedo

3.6.5.1 Procesamiento placa base IX-L4-90A

Los datos utilizados para procesar las coordenadas de la base fueron: archivo crudo (37862770.T01), 2 Estaciones de Monitoreo Continuo (CXEC277a.T02 y QVEC277a.T02) y efemérides precisas (igs20214.sp3). Se procesaron las líneas base, obteniendo las coordenadas que se detallan en la Tabla 26. El esquema de procesamiento se muestra en la Figura 33.

Tabla 26

Coordenadas Placa Base Línea Latacunga - Quevedo

Placa	UTM		Altura elipsoidal (m)	Precisiones		
	Este (m)	Norte (m)		σE	σN	σh
IX-L4-90A	710383.804	9903862.929	739.1662	0.016	0.002	0.020

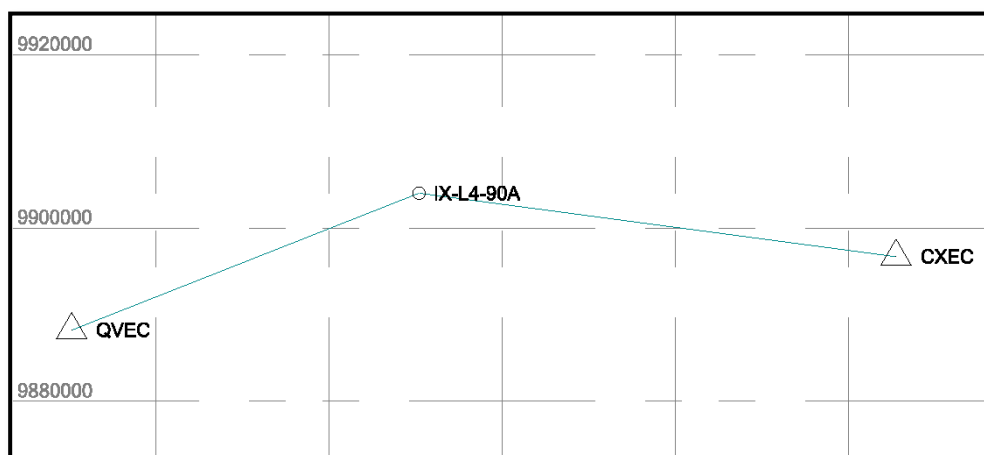


Figura 33. Esquema Procesamiento IX-L4-90A

3.6.5.2 Procesamiento placas móviles

Se fijaron las coordenadas de la base (IX-L4-90A) a partir de la información que se muestra en la Tabla 26, y se procesaron las líneas base de todos los móviles. En la Tabla 27 se presentan los resultados del procesamiento de las placas móviles.

Tabla 27

Coordenadas Placas Móviles Línea Latacunga - Quevedo

Placa	UTM		Altura elipsoidal (m)	Precisiones		
	Este (m)	Norte (m)		σE	σN	σh
IX-L4-88A	713130.26	9902946.2920	885.9639	0.016	0.004	0.022
IX-L4-86A	715294.154	9902036.521	1036.2295	0.017	0.007	0.023
IX-L4-80A	717030.933	9897143.46	1642.4046	0.017	0.004	0.027
IX-L4-76A	720504.991	9895609.284	2091.0894	0.016	0.006	0.026
IX-L4-74A	721728.344	9895248.828	2287.3465	0.016	0.004	0.022

3.6.6 Procesamiento Línea Ambato – Baños

3.6.6.1 Procesamiento placa base A-B-11B

Los datos utilizados para procesar las coordenadas de la base fueron: archivo crudo (37863060.T01), 2 Estaciones de Monitoreo Continuo (CXEC306a.T02 y ABEC306a.T02) y efemérides precisas (igs20255.sp3). Se procesaron las líneas base, obteniendo las coordenadas que se detallan en la Tabla 28. El esquema de procesamiento se muestra en la Figura 34.

Tabla 28
Coordenadas Placa Base Línea Ambato – Baños

Placa	UTM		Altura elipsoidal (m)	Precisiones		
	Este (m)	Norte (m)		σE	σN	σh
A-B-11B	770661.829	9852338.956	2751.5258	0.010	0.005	0.026

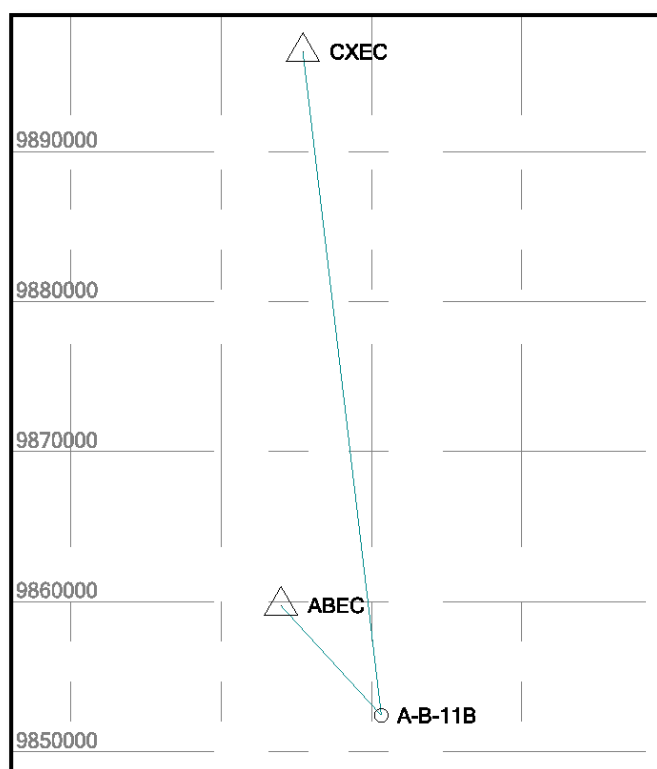


Figura 34. Esquema Procesamiento A-B-11B

3.6.6.2 Procesamiento placas móviles

Se fijaron las coordenadas de la base (A-B-11B) a partir de la información que se muestra en la Tabla 28, y se procesaron las líneas base de todos los móviles. En la Tabla 29, se presentan los resultados del procesamiento de las placas móviles.

Tabla 29
Coordenadas Placas Móviles Línea Ambato – Baños

Placa	UTM		Altura elipsoidal (m)	Precisiones		
	Este (m)	Norte (m)		σE	σN	σh
A-B-15	775252.009	9852823.2684	2491.6077	0.010	0.005	0.027
XXXI-L1-9B	776566.942	9849621.6446	2387.9918	0.011	0.006	0.028
XXXI-L1-12A	778200.26	9847168.4352	2090.8645	0.010	0.005	0.027
XXXI-L1-16A	781356.434	9844237.436	2033.2981	0.010	0.006	0.027
XXXI-L1-18A	783892.241	9844924.131	1970.3225	0.010	0.006	0.028

3.7 Aplicación de Nivelación GPS

El modelo matemático utilizado se muestra en la ecuación 2.34, sección 2.7.3 del marco teórico. Los datos que se utilizaron para cumplir con este cálculo fueron las ondulaciones geoidales derivadas del modelo EGM08, las alturas elipsoidales obtenidas del posicionamiento satelital, y las alturas niveladas oficiales del IGM de las placas base de cada línea. Con esto se calculó la altura nivelada utilizando el método de Nivelación GPS.

3.7.1 Nivelación GPS Línea Quito – Latacunga

La información de nivelación que proporcionó el Instituto Geográfico Militar para esta línea corresponde al año 2008.

Se aplicó el método para 4 placas, 3 de estas se nivelaron en sentido norte – sur, mientras que el último punto, ante la ausencia de placas de la RCBV, en sentido Sur – Norte. Debido a que no se cumplió con los criterios de nivelación GPS que indica un solo sentido de nivelación, se planteó una línea de verificación correspondiente a la zona 1 de variación, para contrastar los errores obtenidos en esta línea.

En la Tabla 30, se aprecian los datos utilizados para calcular las alturas niveladas GPS. Se considera como base la placa IX-L3-15A y en la Figura 35 se muestra el croquis de nivelación correspondiente.

Tabla 30
Nivelación GPS Línea Quito – Latacunga

Altura nivelada IGM (m)	Placa	Altura elipsoidal (m)	Ondulación geoidal (m)	Altura nivelación GPS (m)
2777.4079	IX-L3-15A	2804.9578	26.571	
	IX-L3-17A	2884.7973	26.6100	2857.2084
	IX-L3-17B	2945.8779	26.636	2918.263
	IX-L3-21A	3028.0022	26.692	3000.3313
	IX-L3-5A-AJ	2929.6316	26.753	2901.8997

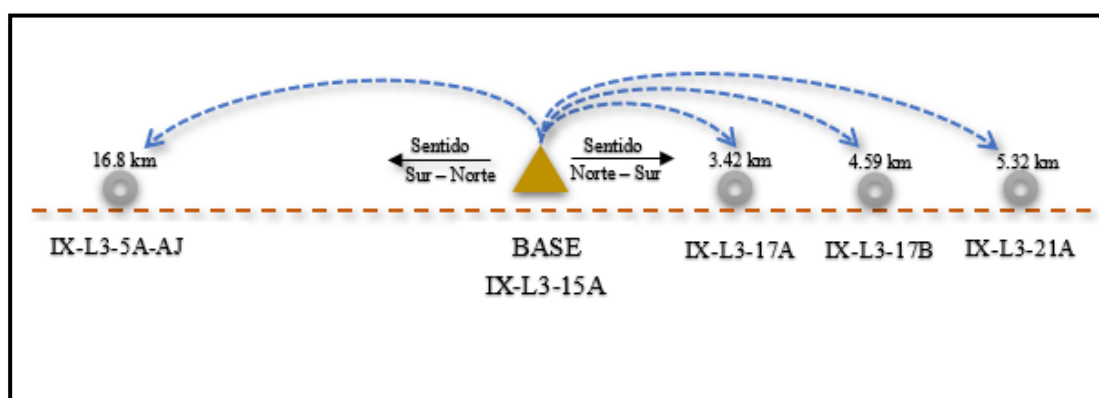


Figura 35. Croquis de Nivelación Línea Quito – Latacunga

3.7.2 Nivelación GPS Línea Manta – Montecristi

La información de nivelación que proporcionó el Instituto Geográfico Militar para esta línea corresponde al año 2010.

Para esta línea, todos los puntos móviles siguieron la misma dirección del circuito a partir de la base. En la Tabla 31, se aprecian los datos utilizados para calcular las alturas niveladas GPS. Se considera como base la placa M-Q-10-A-JA y en la Figura 36 se muestra el croquis de nivelación correspondiente.

Tabla 31

Nivelación GPS Línea Manta – Montecristi

Altura nivelada IGM (m)	Placa	Altura elipsoidal (m)	Ondulación geoidal (m)	Altura nivelación GPS (m)
120.3987	M-Q-10-A-JA	135.3942	14.657	
	II-L58-16	128.7873	14.7190	113.7298
	II-L58-14	146.8851	14.857	131.6896
	II-L58-12	200.0997	15.009	184.7522
	II-L58-11	238.5228	15.09	223.0943
	II-L58-10	292.616	15.132	277.1455
	II-L58-8	164.665	15.254	149.0725
	II-L58-7	126.573	15.328	110.9065

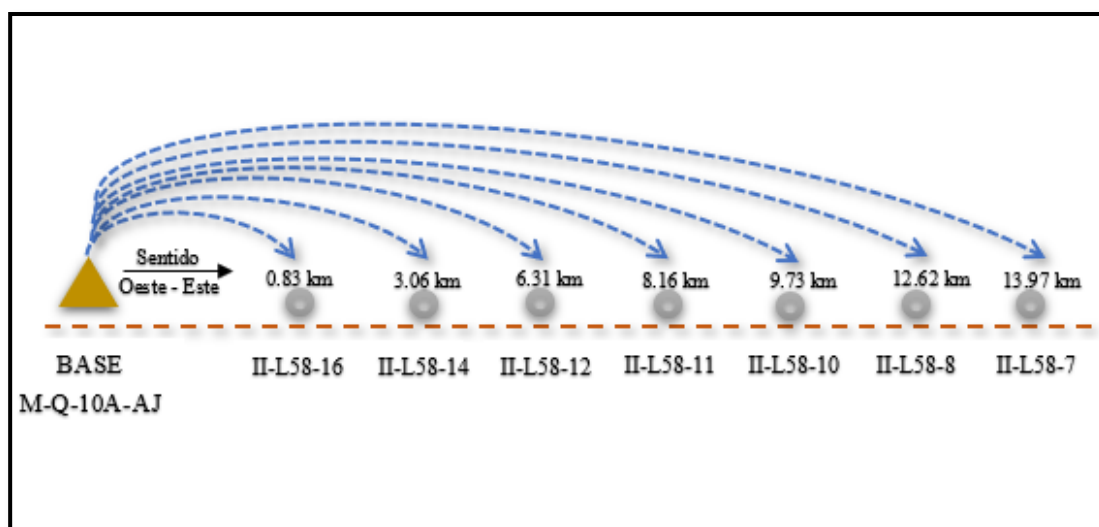


Figura 36. Croquis de Nivelación Línea Manta – Montecristi

3.7.3 Nivelación GPS Línea Cuyuja – Baeza

La información de nivelación que proporcionó el Instituto Geográfico Militar para esta línea corresponde al año 2004.

Para seguir un solo sentido de nivelación del circuito, se tomó la placa XXIX-L1-48C como base. Además, la placa XXIX-L1-50A, fue descartada para este análisis, debido a que no cumplía con los estándares de calidad utilizados para el procesamiento de datos GPS (Tabla 17).

En la Tabla 38, se aprecian los datos utilizados para calcular las alturas niveladas GPS, y en la Figura 37 se muestra el croquis de nivelación correspondiente.

Tabla 32
Nivelación GPS Línea Cuyuja - Baeza

Altura nivelada IGM (m)	Placa	Altura elipsoidal (m)	Ondulación geoidal (m)	Altura nivelación GPS (m)
2364.8365	XXIX-L1-48C	2392.9281	26.718	
	XXIX-L1-51A	2244.8889	26.3760	2217.1393
	XXIX-L1-54C	1960.6576	25.9650	1933.2618
	XXIX-L1-56A	1846.7662	25.479	1819.9136
	XXIX-L2-2A	1871.6275	25.1820	1845.0719

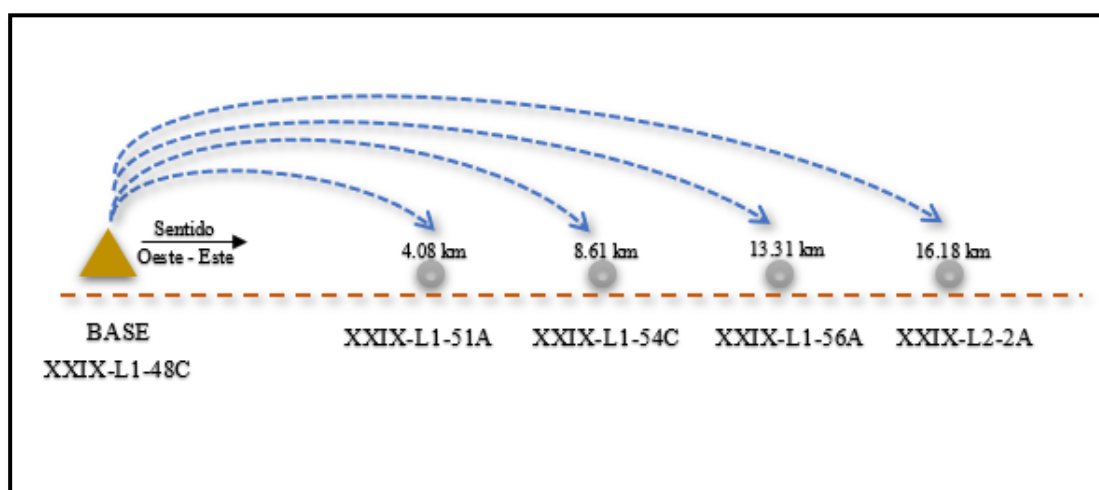


Figura 37. Croquis de Nivelación Línea Cuyuja - Baeza

3.7.4 Nivelación GPS Línea Puerto López – La Libertad

La información de nivelación que proporcionó el Instituto Geográfico Militar para esta línea corresponde al año 2017.

Para esta línea, todos los puntos móviles siguieron la misma dirección del circuito a partir de la base. En la Tabla 33, se aprecian los datos utilizados para calcular las alturas niveladas GPS. Se considera como base la placa J-PL-5B y en la Figura 38 se muestra el croquis de nivelación correspondiente.

Tabla 33
Nivelación GPS Línea Puerto López – La Libertad

Altura nivelada IGM (m)	Placa	Altura elipsoidal (m)	Ondulación geoidal (m)	Altura nivelación GPS (m)
34.7179	J-PL-5B	50.1204	15.13	
	J-PL-4B	44.3655	15.1970	28.896
	L-M-70	29.9988	14.996	14.7303
	L-M-66	115.0364	14.57	100.1939
	L-M-64	21.1881	14.366	6.5496

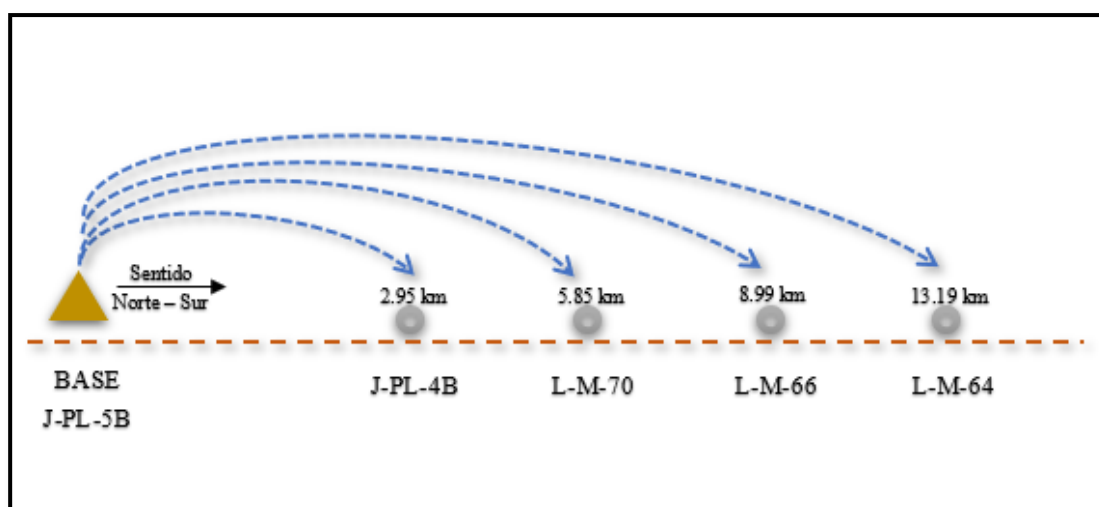


Figura 38. Croquis de Nivelación Línea Puerto López – La Libertad

3.7.5 Nivelación GPS Línea Latacunga – Quevedo

La información de nivelación que proporcionó el Instituto Geográfico Militar para esta línea corresponde al año 2012.

Para esta línea, todos los puntos móviles siguieron la misma dirección del circuito a partir de la base. En la Tabla 34, se aprecian los datos utilizados para calcular las alturas niveladas GPS. Se considera como base la placa IX-L4-90A y en la Figura 39 se muestra el croquis de nivelación correspondiente.

Tabla 34
Nivelación GPS Línea Latacunga - Quevedo

Altura nivelada IGM (m)	Placa	Altura elipsoidal (m)	Ondulación geoidal (m)	Altura nivelación GPS (m)
716.2725	IX-L4-90A	739.1662	22.396	
	IX-L4-88A	885.9639	22.9390	862.5272
	IX-L4-86A	1036.2295	23.368	1012.3638
	IX-L4-80A	1642.4046	23.654	1618.2529
	IX-L4-76A	2091.0894	24.315	2066.2767
	IX-L4-74A	2287.3465	24.531	2262.3178

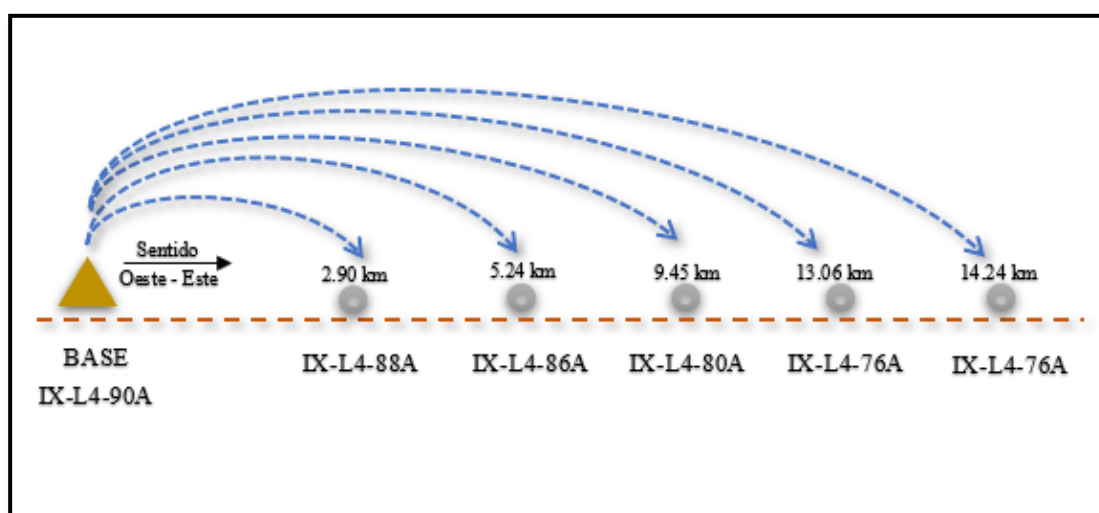


Figura 39. Croquis de Nivelación Línea Latacunga – Quevedo

3.7.6 Nivelación GPS Línea Ambato – Baños

La información de nivelación que proporcionó el Instituto Geográfico Militar para esta línea corresponde al año 2009.

Para esta línea, todos los puntos móviles siguieron la misma dirección del circuito a partir de la base. En la Tabla 35, se aprecian los datos utilizados para calcular las alturas niveladas GPS. Se considera como base la placa XXXI-L1-18A y en la Figura 40 se muestra el croquis de nivelación que se siguió.

Tabla 35

Nivelación GPS Línea Ambato - Baños

Altura nivelada IGM (m)	Placa	Altura elipsoidal (m)	Ondulación geoidal (m)	Altura nivelación GPS (m)
1943.3653	XXXI-L1-18A	1970.3225	26.01	
	XXXI-L1-16A	2033.2981	26.08	2006.27095
	XXXI-L1-12A	2090.8645	26.1090	2063.80835
	XXXI-L1-9B	2388.0137	26.0820	2360.96265
	A-B-15	2491.5530	26.0210	2464.63955
	A-B-11B	2751.5258	25.933	2724.64565

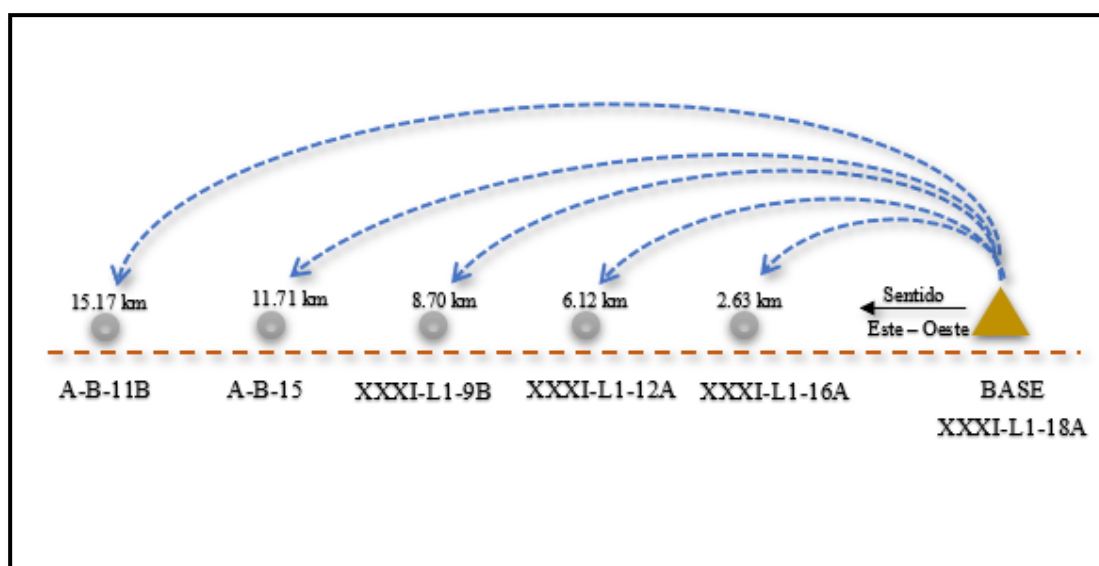


Figura 40. Croquis de Nivelación Línea Ambato – Baños

3.8 Errores entre nivelación geométrica IGM y nivelación GPS

Los errores (diferencias) de alturas niveladas, se determinó restando la altura nivelada IGM de la obtenida a través del método de nivelación GPS. Además, estas diferencias se determinaron ppm (milímetros de diferencia de altura/distancia en kilómetros a la base). Las gráficas resultantes se compararon con las gráficas de las precisiones que poseen la nivelación geométrica de primer y segundo orden.

3.8.1 Errores Línea Quito – Latacunga

En la Tabla 36, se muestran los errores en centímetros y expresado en ppm de alturas niveladas determinadas en la línea Quito – Latacunga. Estas diferencias gráficamente se presentan en la Figura 41.

Tabla 36

Errores Alturas Línea Quito - Latacunga

Placa	Altura Nivelación IGM (m)	Altura Nivelación GPS (m)	Distancia (km)	Error (cm)	PPM (mm/km)
BASE IX-L3-15A	2777.4079				
IX-L3-17A	2857.1878	2857.2084	3.42	2.06	6.02
IX-L3-17B	2918.2171	2918.263	5.36	4.59	8.57
IX-L3-21A	3000.2781	3000.3313	8.62	5.32	6.17
IX-L3-5A-AJ	2902.1377	2901.8997	16.84	23.8	14.13

En la línea Quito – Latacunga (zona 1 de variación), se analizaron 4 placas de nivelación, cuyos resultados de los errores se muestran en la Tabla 36. El posicionamiento satelital se lo realizó con equipos GNSS Trimble R4. De estas placas, 3 se tomaron en sentido Norte – Sur, la placa menos distante se encontró a 3.42 km, y tuvo un error de 2.06 cm, la placa siguiente, se encontró a 5.36 km y mostró un error de 4.59 cm, la placa más distante en este sentido se encontró a 8.62 km, y presentó un error de 5.32 cm. Debido a que en este sentido no se encontraron más placas de nivelación, se tomó una placa en sentido Sur – Norte, que se ubicó a una distancia de 16.84 km de la base, y presentó un error de 23.8 cm. Ya que en esta línea no todas las placas siguieron un solo sentido de nivelación, tomó una línea de verificación para la zona 1 (línea Ambato – Baños).

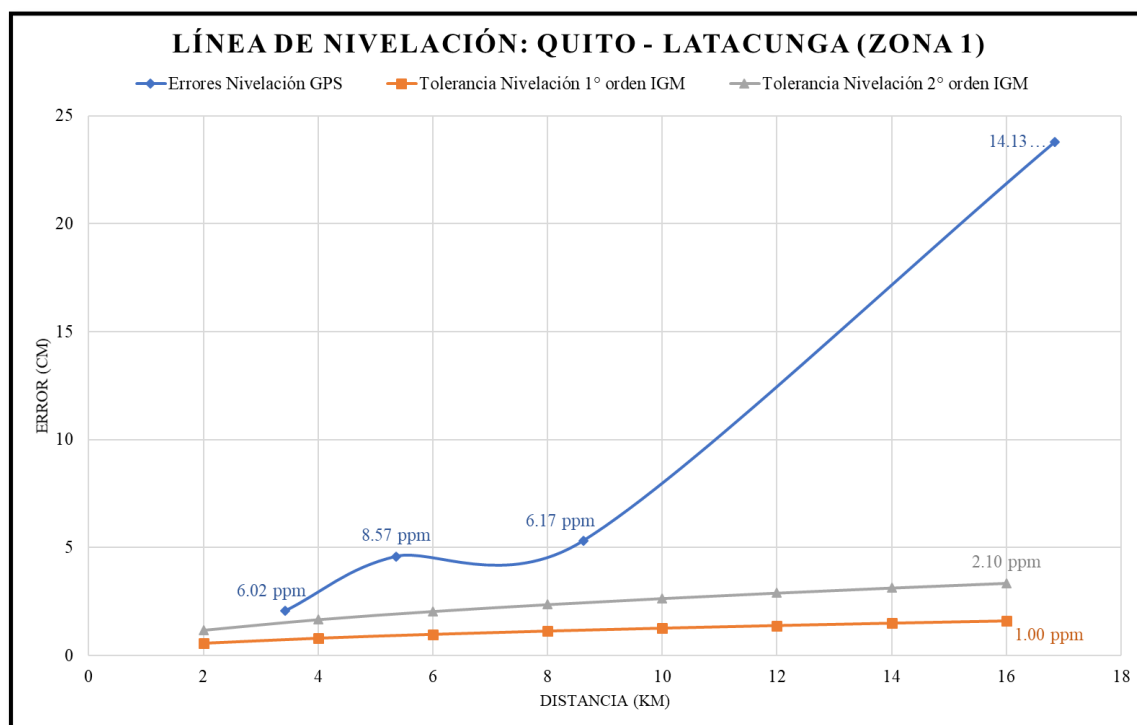


Figura 41. Errores (ppm) Alturas Línea Quito – Latacunga

3.8.2 Errores Línea Manta – Montecristi

En la Tabla 37, se muestran los errores en centímetros y expresado en ppm de alturas niveladas determinadas de la línea Manta – Montecristi. Estas diferencias gráficamente se presentan en la Figura 42.

Tabla 37

Errores Alturas Línea Manta – Montecristi

Placa	Altura Nivelación IGM (m)	Altura Nivelación GPS (m)	Distancia (km)	Error (cm)	PPM (mm/km)
BASE M-Q-10-A-JA	120.3987				
II-L58-16	113.7232	113.7298	0.83	0.66	7.93
II-L58-14	131.6744	131.6896	3.06	1.52	4.96
II-L58-12	184.7069	184.7522	6.31	4.53	7.18
II-L58-11	223.0409	223.0943	8.16	5.34	6.55
II-L58-10	277.0653	277.1455	9.73	8.02	8.24
II-L58-8	148.9549	149.0725	12.62	11.76	9.32
II-L58-7	110.673	110.9065	13.97	23.35	16.71

Para la línea Manta – Montecristi (zona 2 de variación), se analizaron un total de 7 placas, cuyos resultados de las diferencias de alturas se pueden observar en la Tabla 37. El posicionamiento de los puntos móviles se realizó con equipos Trimble R3 de una frecuencia. La placa más cercana a la base (II-L58-16) con una distancia de 0.83 kilómetros presentó un error de 0.66 centímetros; mientras se tenía una mayor distancia, el error igualmente incrementaba. La placa II-L58-8, con 12.62 kilómetros de distancia a la base, se obtuvo un error de 11.76 centímetros, pero la última placa (II-L58-7) ubicada a 13.97 km de la base, tuvo un error de 23.35 centímetros, 11.59 centímetros más que la placa anterior, en tan solo 1.35 km.

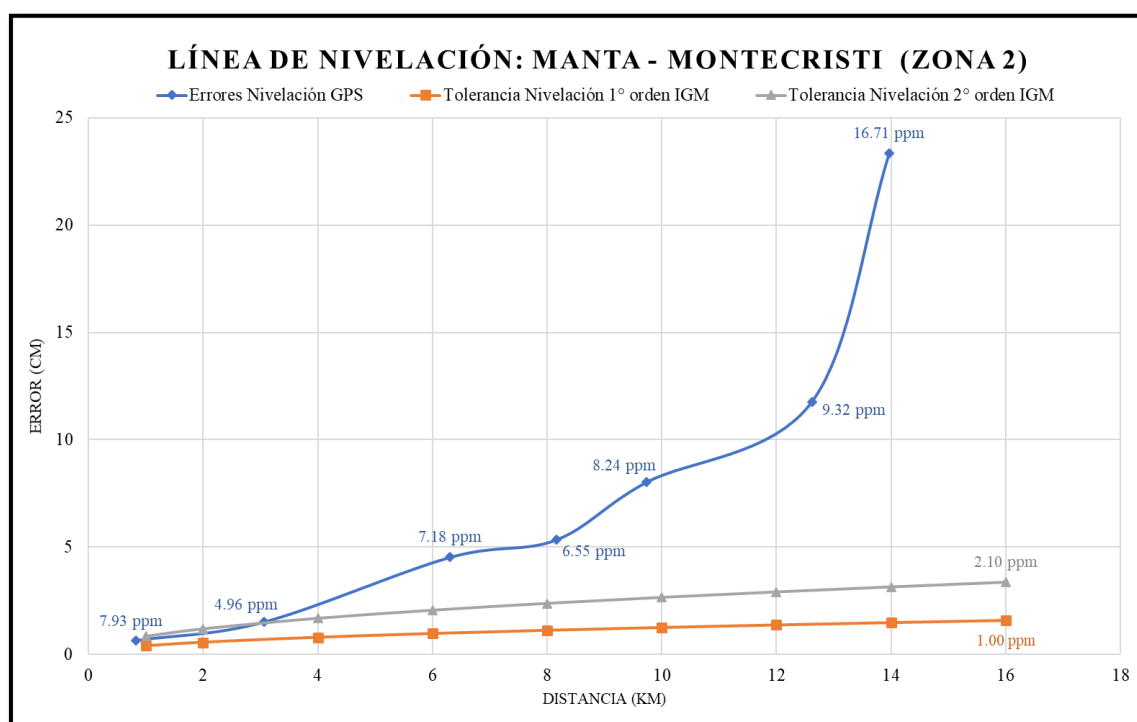


Figura 42. Errores (ppm) Alturas Línea Manta – Montecristi

3.8.3 Errores Línea Cuyuja – Baeza

En la Tabla 38, se muestran los errores en centímetros y expresado en ppm de alturas niveladas determinadas de la línea Cuyuja – Baeza. Estas diferencias gráficamente se presentan en la Figura 43.

Tabla 38
Errores Alturas Línea Cuyuja – Baeza

Placa	Altura Nivelación IGM (m)	Altura Nivelación GPS (m)	Distancia (km)	Error (cm)	PPM (mm/km)
BASE XXIX-L1-48C	2364.8365				
XXIX-L1-51A	1845.2998	2217.1393	4.08	4.45	10.90
XXIX-L1-54C	1933.3276	1933.2618	8.61	6.58	7.64
XXIX-L1-56A	2217.0948	1819.9136	13.31	18.39	13.82
XXIX-L2-2A	2306.3153	1845.0719	16.18	22.79	14.08

En la línea Cuyuja – Baeza (zona 3 de variación), se analizaron 4 placas de nivelación, los resultados de los errores (diferencias de alturas) se muestran en la Tabla 38. Los equipos utilizados para el posicionamiento fueron GNSS Trimble R4 de doble frecuencia. La placa más cercana a la base con una distancia de 4.08 km, presentó un error de 4.45 cm. Seguido a esto, la placa XXIX-L1-54C, ubicada a 8.61 km, presentó un error de 6.58 cm. La siguiente placa, ubicada a 13.31 km de distancia a la base, presentó un error de 18.39 centímetros, 11.81 cm de diferencia con respecto a la placa anterior. Finalmente, la placa XXIX-L2-2A, ubicada a 16.18 km presentó un error de 22.79 cm.

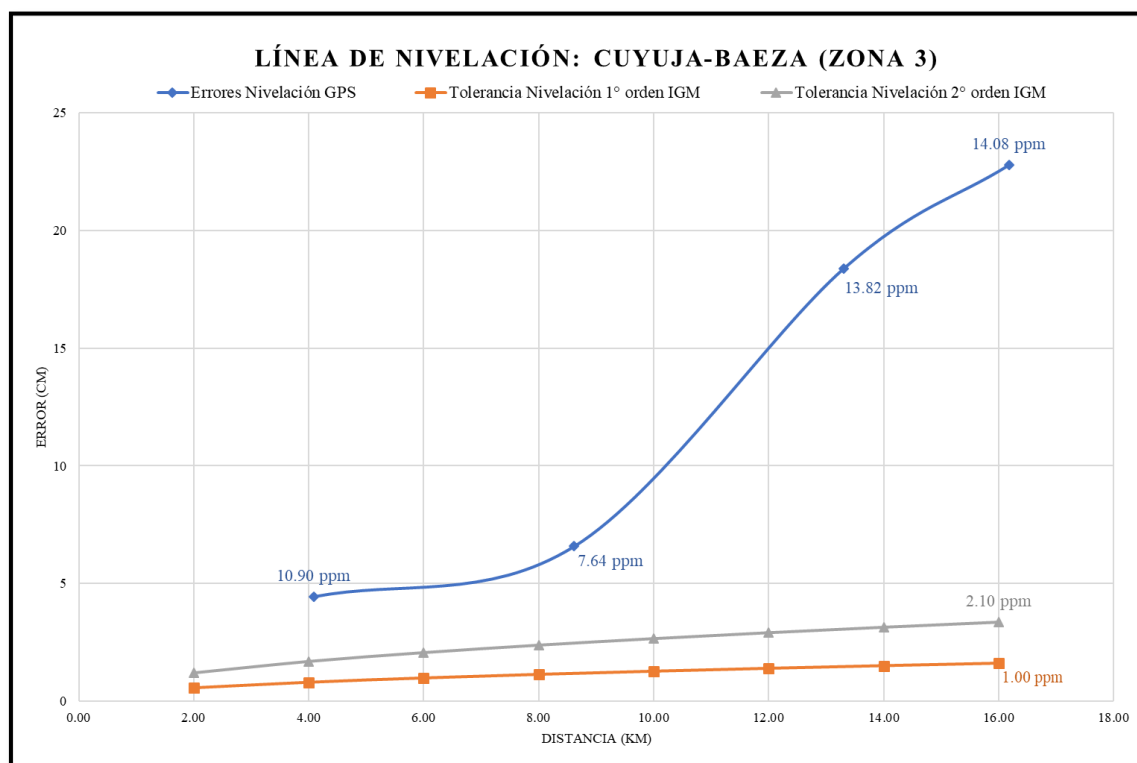


Figura 43. Errores (ppm) Alturas Línea Cuyuja – Baeza

3.8.4 Errores Línea Puerto López – La Libertad

En la Tabla 39, se muestran los errores en centímetros y expresado en ppm de alturas niveladas determinadas de la línea Puerto López – La Libertad. Estas diferencias gráficamente se presentan en la Figura 44.

Tabla 39

Errores Alturas Línea Puerto López – La Libertad

Placa	Altura Nivelación IGM (m)	Altura Nivelación GPS (m)	Distancia (km)	Error (cm)	PPM (mm/km)
BASE J-PL-5B	34.7179				
J-PL-4B	28.8921	28.896	2.95	0.39	1.32
L-M-70	14.6718	14.7303	5.35	5.85	10.93
L-M-66	100.2567	100.1939	10.42	15.27	14.66
L-M-64	6.5956	6.5496	13.19	16.48	12.50

En la línea Puerto López – La Libertad (zona 4 de variación), se analizaron 4 placas de nivelación, los resultados de las diferencias de alturas se muestran en la Tabla 39. El posicionamiento de los puntos móviles se realizó con equipos Trimble R3 de una frecuencia. La placa más cercana, contó con un error de 0.39 cm a 2.95 km. La segunda placa, ubicada a 5.35 km de distancia a la base, presentó un error de 5.85 cm. La placa tercera, ubicada a 10.42 km, presentó un error mucho mayor a la placa anterior de 15.27 cm, existiendo una diferencia entre estas de 9.42 cm. Finalmente la placa L-M-64, a una distancia de 13.19 km, contó con un error de 16.48 cm.

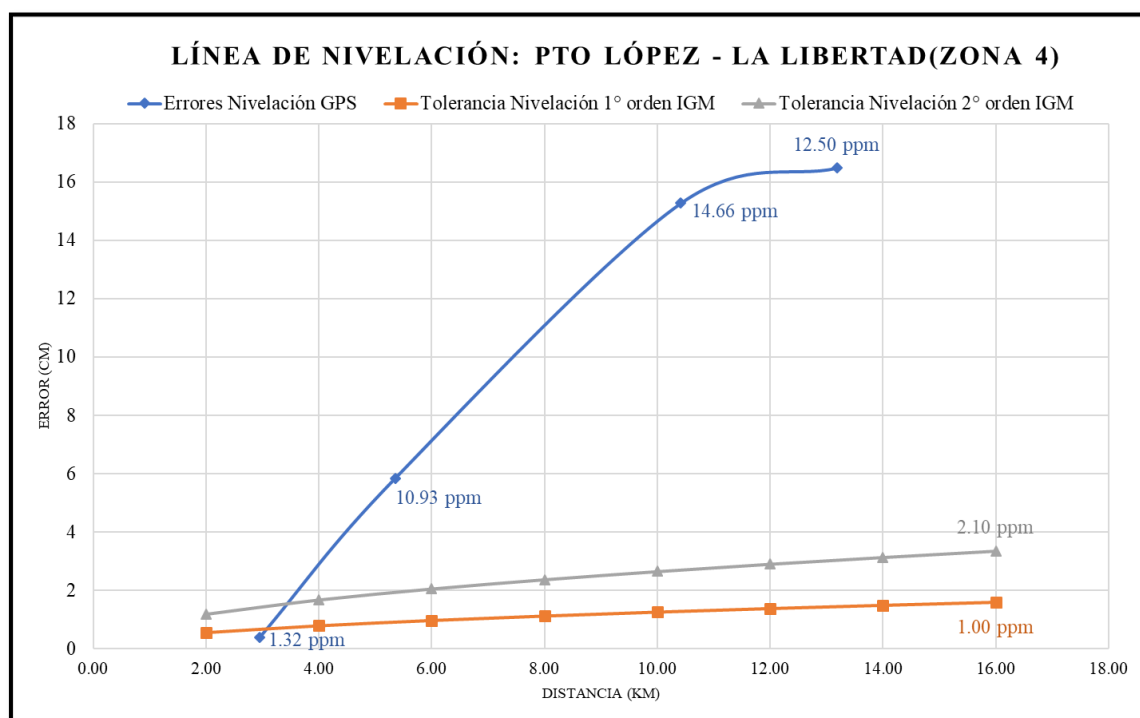


Figura 44. Errores (ppm) Alturas Línea Puerto López – La Libertad

3.8.5 Errores Línea Latacunga – Quevedo

En la Tabla 40, se muestran los errores en centímetros y expresado en ppm de alturas niveladas determinadas de la línea Latacunga – Quevedo. Estas diferencias gráficamente se presentan en la Figura 45.

Tabla 40
Errores Alturas Línea Latacunga – Quevedo

Placa	Altura Nivelación IGM (m)	Altura Nivelación GPS (m)	Distancia (km)	Error (cm)	PPM (mm/km)
BASE IX-L4-90A	716.2725				
IX-L4-88A	862.4847	862.5272	2.90	4.25	14.68
IX-L4-86A	1012.2921	1012.3638	5.24	7.17	13.69
IX-L4-80A	1618.0884	1618.2529	9.45	16.45	17.40
IX-L4-76A	2065.967	2066.2767	13.06	30.97	23.71
IX-L4-74A	2261.9904	2262.3178	14.24	32.74	22.98

En la línea Latacunga – Quevedo (zona 5 de variación), se analizaron 5 placas de nivelación, los resultados de los errores (diferencias de alturas) se muestran en la Tabla 40. Los equipos utilizados para el posicionamiento fueron GNSS Trimble R4 de doble frecuencia. La placa más cercana a la base con una distancia de 2.90 km, presentó un error de 4.25 cm. En la segunda placa, ubicada a 5.24 km de la base, presentó un error de 7.17 cm. La placa siguiente, contó con una distancia de 9.45 km, y el error con respecto a la placa anterior incrementó considerablemente en 9.28 centímetros. El incremento de error de la placa siguiente a esta última fue de 14.52 cm, a una distancia de 13.06 km. Finalmente la placa IX-L4-74A, ubicada a 14.24 km presentó un error de 32.74 cm, 1.77 cm más que la placa anterior.

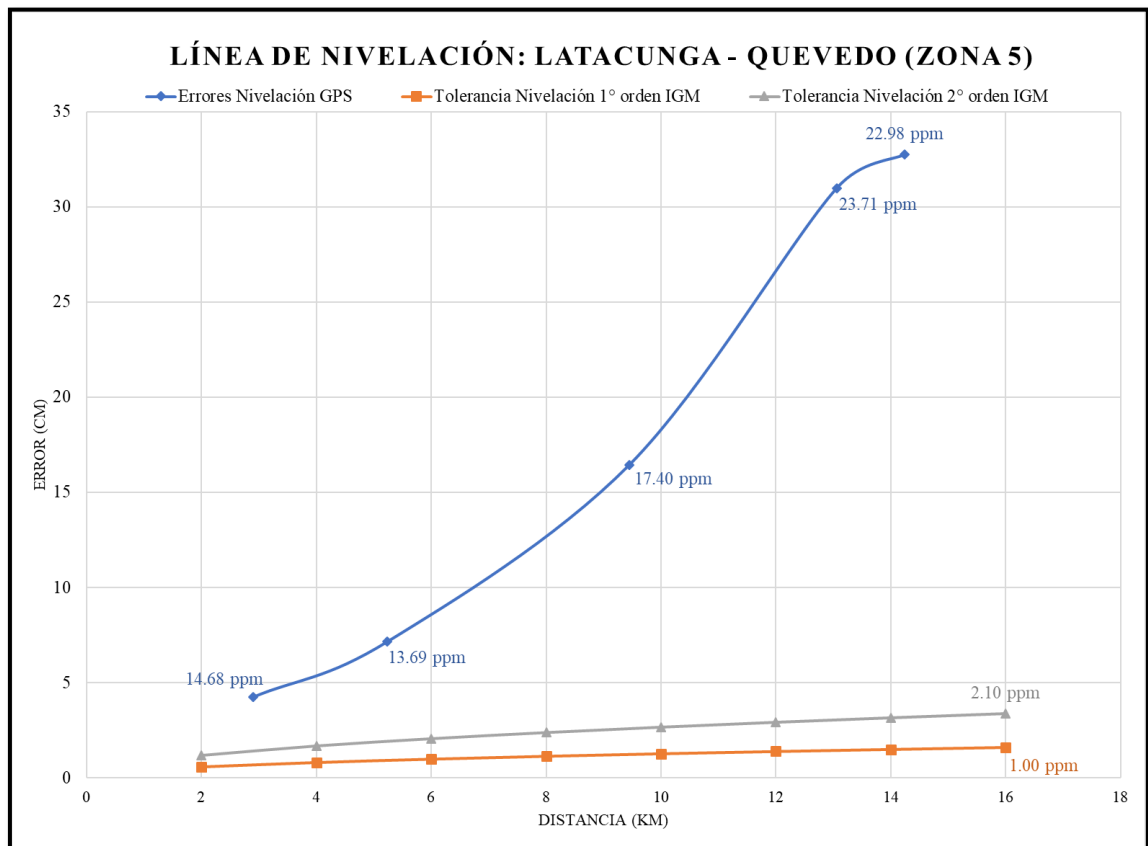


Figura 45. Errores (ppm) Alturas Línea Latacunga – Quevedo

3.8.6 Errores Línea Ambato – Baños

En la Tabla 41, se muestran los errores en centímetros y expresado en ppm de alturas niveladas determinadas de la línea Ambato – Baños. Estas diferencias gráficamente se presentan en la Figura 46.

Tabla 41
Diferencias Alturas Línea Ambato – Baños

Placa	Altura Nivelación IGM (m)	Altura Nivelación GPS (m)	Distancia (km)	Error (cm)	PPM (mm/km)
BASE XXXI-L1-18A	1943.6354				
XXXI-L1-16A	2006.2484	2006.27095	4.62	2.251	8.57
XXXI-L1-12A	2063.8385	2063.80835	6.50	3.018	4.93
XXXI-L1-9B	2360.9956	2360.96265	9.14	3.291	3.78
A-B-15	2464.5428	2464.63955	13.42	9.675	8.26
A-B-11B	2724.4496	2724.64565	15.17	19.6	12.92

En la línea Ambato – Baños (zona 1 de variación), considerada de verificación, se analizaron 5 placas de nivelación, los resultados de los errores (diferencias) de alturas se muestran en la Tabla 41. Los equipos utilizados para el posicionamiento fueron GNSS Trimble R4 de doble frecuencia. La placa más próxima a la base, con 4.62 km mostró un error de 2.25 cm. En las siguientes dos placas (XXXI-L1-12A y XXXI-L1-9B), el error incrementó 1 cm, con respecto a la primera placa. La cuarta placa ubicada a 13.42 km, presenta un error de 9.68 cm. Finalmente, la placa A-B-11B, ubicada a 15.17 km, mostró un error de 19.6 cm, 10 centímetros de incremento con respecto a la placa anterior.

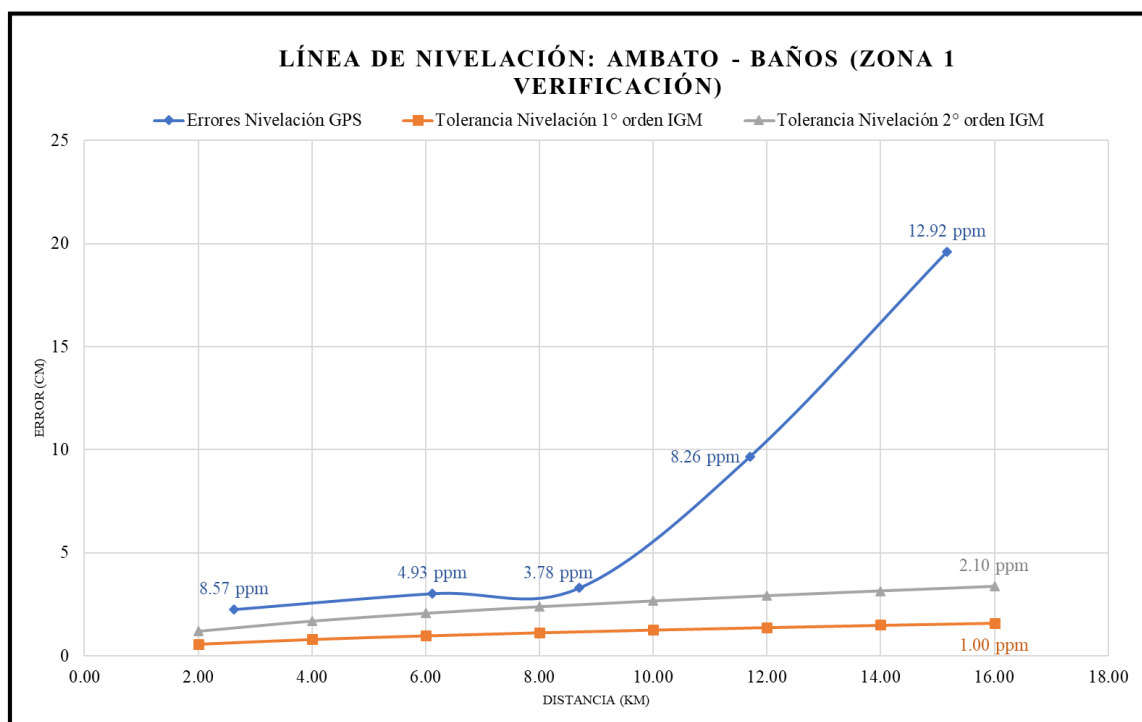


Figura 46. Errores (ppm) Alturas Línea Ambato – Baños

3.8.7 Resumen de los errores de alturas niveladas GPS

En la Figura 47, se muestran las gráficas de error de nivelación GPS vs distancia, correspondientes a cada una de las zonas de variación de ondulación geoidal. En estas gráficas se puede apreciar claramente la comprobación de las hipótesis iniciales. Se aprecia que a una mayor distancia a la base el error también incrementa, además, que los errores son mayores dependiendo de la zona de variación de ondulación geoidal donde se encuentra. Es decir, el error en altura determinada con nivelación GPS es directamente proporcional a la distancia a la base y a la zona de variación donde se encuentre.

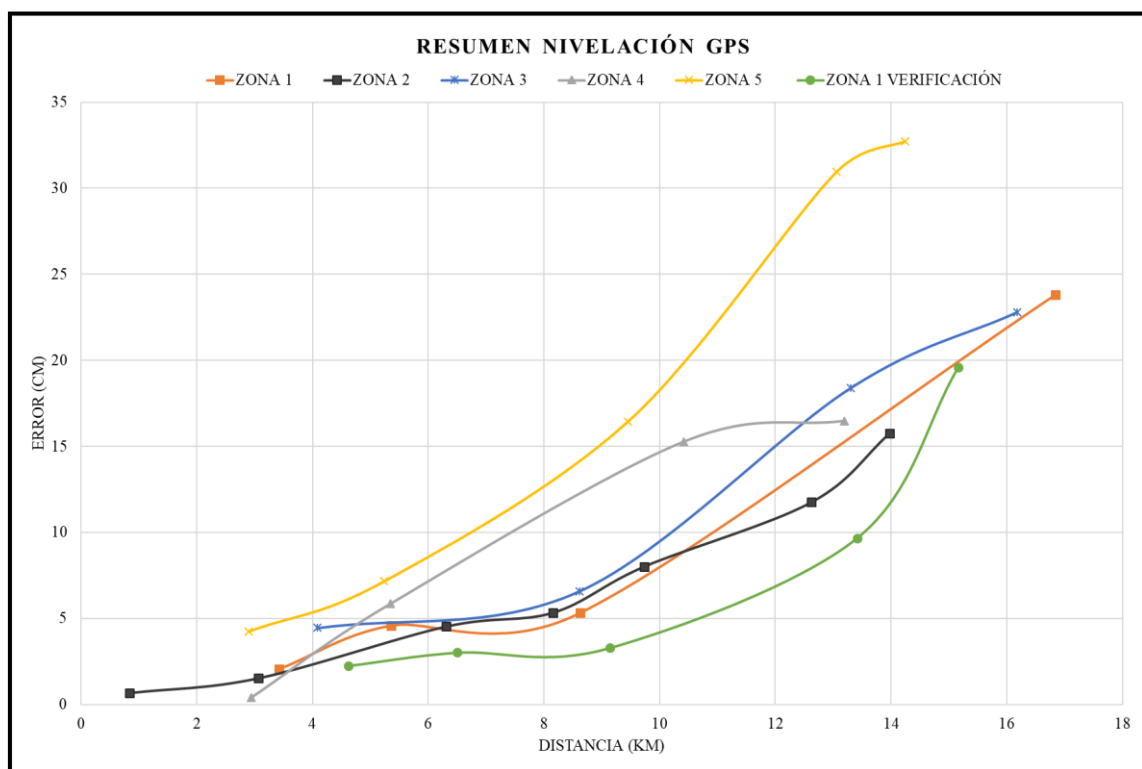


Figura 47. Líneas de Nivelación GPS

Cabe mencionar que la línea Quito – Latacunga, correspondiente a la zona 1 de variación, no presentó las características adecuadas para aplicar nivelación GPS, es por lo que en la Figura 39, se aprecia que la curva perteneciente a esta línea no se ajusta de manera similar a las demás líneas. Ante esto, esta línea no será considerada para posteriores análisis.

En la Figura 48, se aprecian las gráficas de las zonas de variación, sin considerar la línea Quito – Latacunga. Por tanto, la línea Ambato - Baños anteriormente llamada de verificación, corresponde a la zona 1.

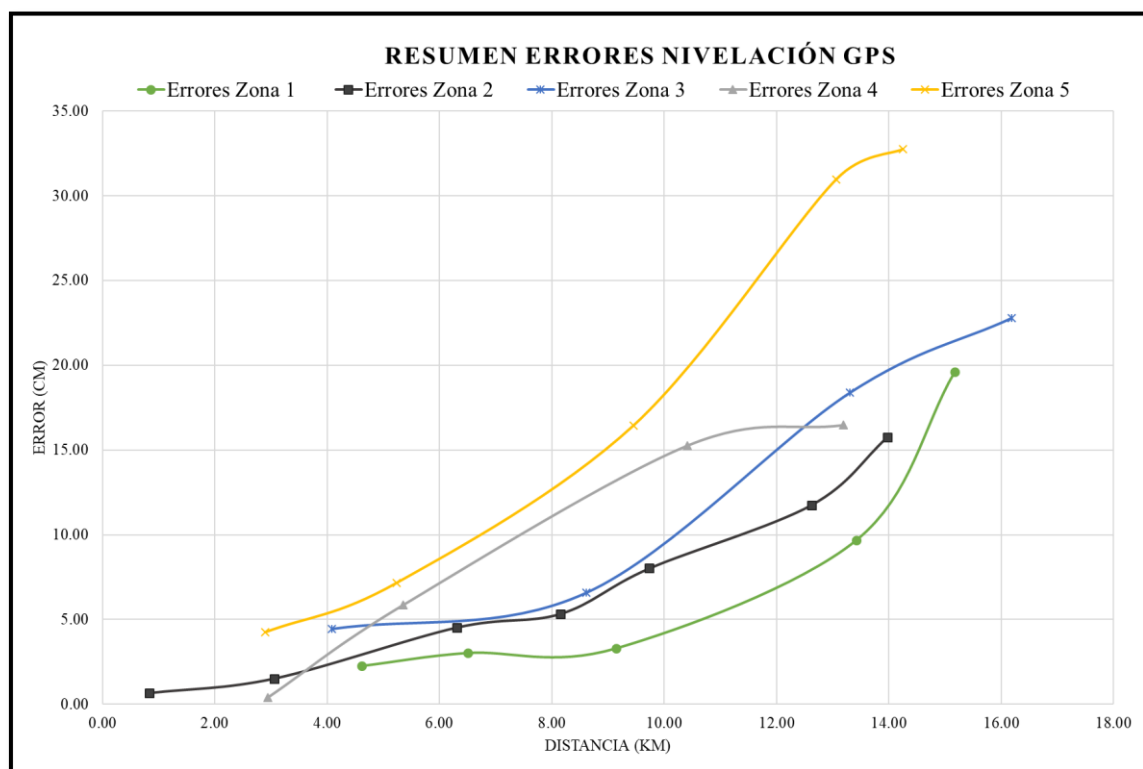


Figura 48. Resumen Errores Nivelación GPS

3.9 Análisis estadístico de los errores de nivelación GPS

El análisis estadístico de los errores de nivelación GPS, para cada una de las zonas de variación de ondulación geoidal, se presentan a continuación.

3.9.1 Análisis estadístico errores Línea Ambato – Baños

En la Tabla 42, se muestran los estadísticos que presentan los errores de la nivelación GPS, en las placas IGM de la Línea Ambato - Baños.

Tabla 42
Análisis Estadístico Errores Línea Ambato – Baños

Estadístico	Errores
Número de datos	5
Media aritmética (cm)	7.57
Desviación estándar (cm)	7.36
Mínimo (cm)	2.25
Máximo (cm)	19.6

Para esta línea se tuvo un total de 5 placas, que presentaron un error medio de 7.57 cm con una desviación estándar de 7.36 cm, el error mínimo de 2.25 cm y el máximo de 19.6 cm.

3.9.2 Análisis estadístico errores Línea Manta – Montecristi

En la Tabla 43, se muestran los estadísticos que presentan los errores de la nivelación GPS, en las placas IGM de la Línea Manta - Montecristi.

Tabla 43
Análisis Estadístico Errores Línea Manta – Montecristi

Estadístico	Errores
Número de datos	7
Media aritmética (cm)	6.80
Desviación estándar (cm)	7.79
Mínimo (cm)	0.66
Máximo (cm)	15.77

Para esta línea se tuvo un total de 7 placas, que presentaron un error medio de 6.80 cm con una desviación estándar de 7.79 cm, el error mínimo de 0.66 cm y el máximo de 15.77 cm.

3.9.3 Análisis estadístico errores Línea Cuyuja – Baeza

En la Tabla 44, se muestran los estadísticos que presentan los errores de la nivelación GPS, en las placas IGM de la Línea Cuyuja - Baeza.

Tabla 44
Análisis Estadístico Errores Línea Cuyuja – Baeza

Estadístico	Errores
Número de datos	4
Media aritmética (cm)	13.05
Desviación estándar (cm)	8.93
Mínimo (cm)	4.45
Máximo (cm)	22.79

Para esta línea se tuvo un total de 4 placas, que presentaron un error medio de 13.05 cm con una desviación estándar de 8.93 cm, el error mínimo de 4.45 cm y el máximo de 22.79 cm.

3.9.4 Análisis estadístico errores Línea Puerto López – La Libertad

En la Tabla 45, se muestran los estadísticos que presentan los errores de la nivelación GPS, en las placas IGM de la Línea Puerto López – La Libertad.

Tabla 45
Análisis Estadístico Errores Línea Puerto López – La Libertad

Estadístico	Errores
Número de datos	4
Media aritmética (cm)	9.50
Desviación estándar (cm)	7.71
Mínimo (cm)	0.39
Máximo (cm)	16.48

Para esta línea se tuvo un total de 4 placas, que presentaron un error medio de 9.50 cm con una desviación estándar de 7.71 cm, el error mínimo de 0.39 cm y el máximo de 16.48 cm.

3.9.5 Análisis estadístico errores Línea Latacunga – Quevedo

En la Tabla 46, se muestran los estadísticos que presentan los errores de la nivelación GPS, en las placas IGM de la Línea Latacunga - Quevedo.

Tabla 46
Análisis Estadístico Errores Línea Latacunga – Quevedo

Estadístico	Errores
Número de datos	5
Media aritmética (cm)	18.31
Desviación estándar (cm)	13.17
Mínimo (cm)	4.25
Máximo (cm)	32.74

Para esta línea se tuvo un total de 5 placas, que presentaron un error medio de 18.31 cm con una desviación estándar de 13.17 cm, el error mínimo de 4.25 cm y el máximo de 32.74 cm.

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 Análisis y Discusión de Resultados

El mapa de zonificación de gradiente de ondulación geoidal (ver Figura 18) se dividió en 5 zonas homogéneas. En cada zona se identificaron placas de nivelación pertenecientes a la RCBV y para cada una de éstas se determinó la altura con respecto al nivel medio del mar aplicando nivelación GPS. Además, se calcularon las diferencias de alturas del método propuesto en comparación con el método tradicional de nivelación. De este cálculo se definieron los errores típicos de 5 cm (ver Figura 49), 10 cm (ver Figura 50) y 15 cm (ver Figura 51) en relación con la distancia nivelada.

La zona 1, considerada de baja variación de ondulación geoidal, presenta un intervalo entre 0.0001 – 0.0379 ppm. Ésta se encuentra ubicada en las planicies de la Costa, en los valles interandinos y en gran parte de la Amazonía. Para esta zona se analizaron 2 líneas de nivelación, Ambato – Baños y Quito – Latacunga. Ésta última como se mencionó en la sección 3.8.7, fue descartada del análisis debido a que no presentaba las características óptimas para aplicar nivelación GPS, por lo que se tomó la línea Ambato – Baños para el análisis del error de esta zona. Esta línea presentó una distancia aproximada de 10.4 km para obtener un error de 5 cm, 13.7 km para un error de 10 cm y 14.6 km para un error de 15 cm (ver Tabla 47).

La zona 2, considerada de variación ligeramente suave, presenta un rango de valores entre 0.0380 – 0.0739 ppm. Se encuentra en su mayoría en la Costa y en la Amazonía. Para esta zona se analizó la línea Manta – Montecristi, y se determinaron las distancias de 7.8 km, 11.2 km y 13.8 km para obtener errores de 5 cm, 10 cm y 15 cm respectivamente (ver Tabla 47).

La zona 3, considerada de variación suave, con un rango de valores entre 0.0740 – 0.1126 ppm, se ubica en las faldas de elevaciones que dan inicio a las diferentes cordilleras. En esta

se analizó la línea de nivelación Cuyuja – Baeza, cuyas distancias para obtener errores de 5 cm, 10 cm y 15 cm, son 6.9 km, 10.1 km y 12.0 km respectivamente (ver Tabla 47).

La zona 4, considerada de variación moderada, presenta un rango de valores entre 0.1127 – 0.1608 ppm. Se encuentra en su mayoría en las estribaciones de las cordilleras. Para esta zona se analizó la línea Puerto López – La Libertad, y se determinaron las distancias de 5.1 km, 7.3 km y 10.1 km para obtener errores de 5 cm, 10 cm y 15 cm respectivamente (ver Tabla 47).

La zona 5, considerada de variación de ondulación geoidal fuerte presenta un intervalo de gradiente entre 0.1609 – 0.2412 ppm. Esta zona se ubica en las estribaciones de la Cordillera de los Andes occidental y oriental, con una forma alargada en sentido norte – sur. Además, se encuentra presente en la cordillera de Chongón – Colonche, presentando una forma alargada de este – oeste. En esta zona, se pueden encontrar desniveles de aproximadamente 2000 metros en una distancia inferior a 15 kilómetros. Las distancias que se obtuvieron para tener errores de 5 cm, 10 cm y 15 cm, son 3.8 km, 6.8 km y 8.9 km respectivamente (ver Tabla 47).

Tabla 47
Errores Típicos Nivelación GPS por Distancia

Zona de variación	Errores			Distancias (km)
	5 (cm)	10 (cm)	15 (cm)	
1	10.4	13.7	14.6	
2	7.8	11.2	13.8	
3	6.9	10.1	12.0	
4	5.1	7.3	10.1	
5	3.8	6.8	8.9	

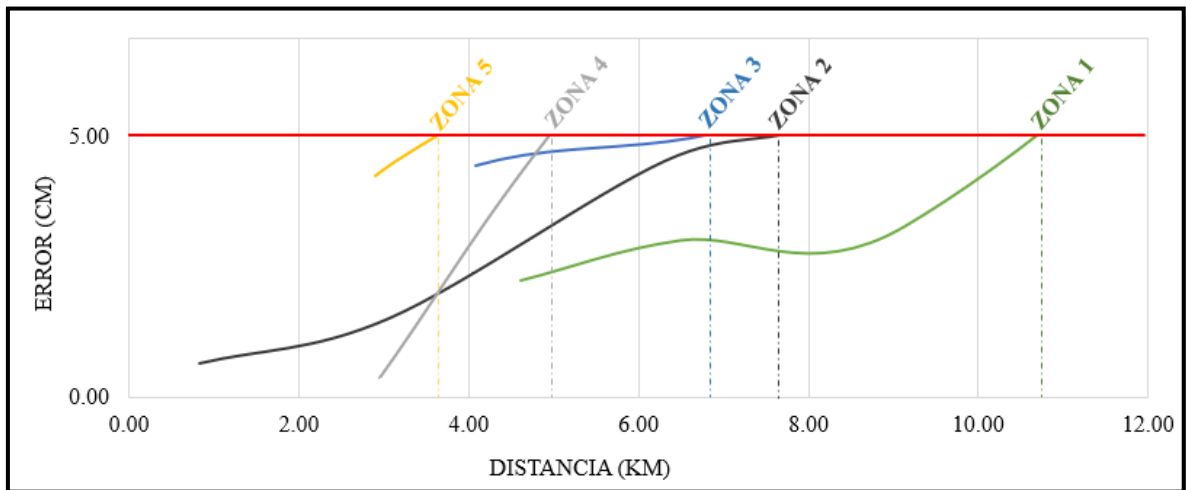


Figura 49. Distancias para un error de 5 cm

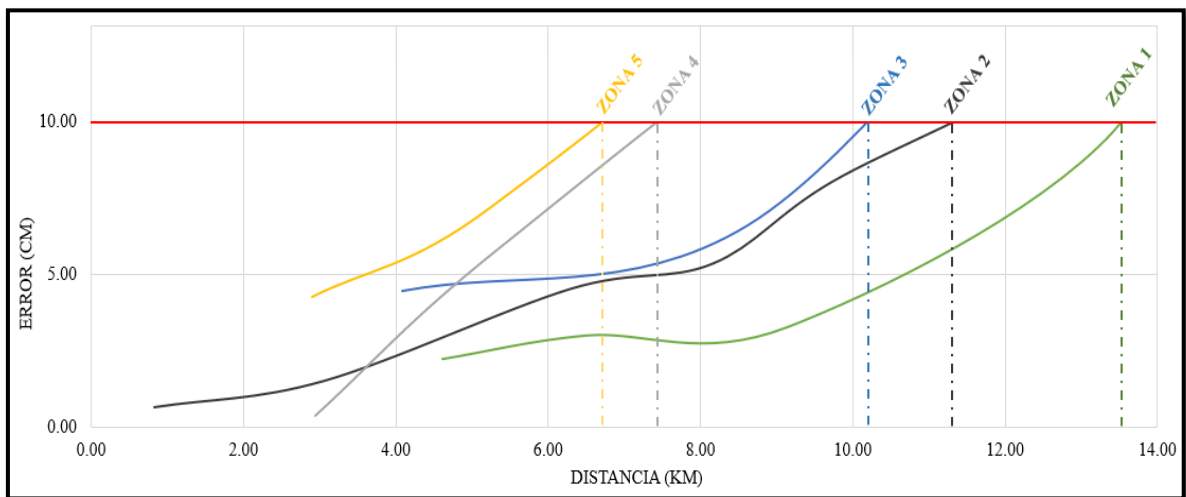


Figura 50. Distancias para un Error de 10 cm

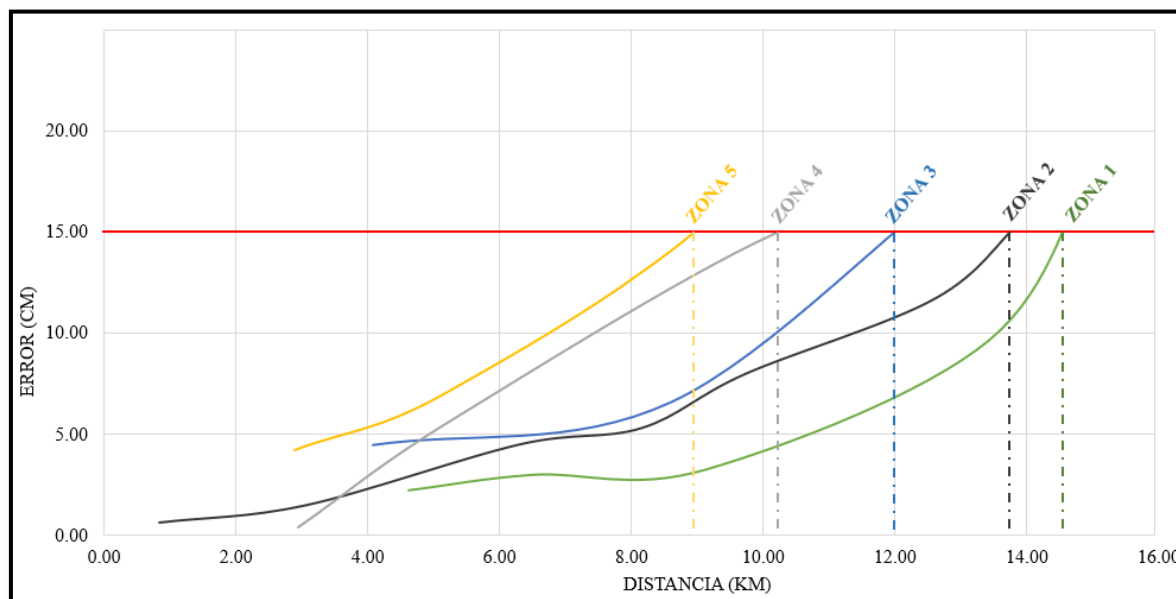


Figura 51. Distancias para un Error de 15 cm

En las Figuras 49, 50 y 51, se aprecia que los errores son directamente proporcionales a la zona de variación a la que pertenecen, es decir, la zona que posee menor variación de ondulación geoidal presenta menor error considerando las distancias niveladas.

De lo mencionado en el párrafo anterior, se pueden tomar como ejemplo las zonas 1 y 5. En la zona 1, se estimó una distancia de 10.4 km, 13.7 km y 14.6 km para obtener errores de 5 cm, 10 cm y 15 cm respectivamente, a diferencia de la zona 5, que para conseguir estos errores se tuvieron distancias de 3.8 km, 6.8 km y 8.9 km.

En relación con el trabajo realizado por Blanco (2010), quien indica que la distancia hasta la que se pueden obtener alturas niveladas con GPS es de 15 km.; los resultados de este estudio muestran que el error de la nivelación GPS dependerá de la zona de variación de ondulación geoidal y la distancia de nivelación.

Sánchez & Martínez (1997), indican que los errores que se obtienen con el método de nivelación GPS alcanzan el orden trigonométrico ($12\text{mm}\sqrt{K}$, $16\text{mm}\sqrt{K}$); en este trabajo se demostró que el error puede ser menor al propuesto, dependiendo, nuevamente, de la zona de variación. En la zona 2 y la zona 4 a una distancia superior a 3 kilómetros se ha obtenido errores menores de 1.52 cm, superando el error de la nivelación trigonométrica propuesta.

Tierra (2009), recomienda no utilizar las ondulaciones geoidales derivadas del modelo EGM08, para transformar alturas elipsoidales obtenidas con GPS a alturas niveladas, ya que para ciertas zonas del país el modelo presenta errores de hasta 4 metros, esto, utilizando la ecuación tradicional del cálculo de alturas niveladas (ecuación 2.6); pero, como se analizó, en este estudio, utilizando el método de nivelación GPS y las ondulaciones del modelo EGM08 se pueden tener errores inferiores a 15 centímetros, dependiendo de la distancia de nivelación.

En la actualidad Carrión (2017), determinó el campo equipotencial (W_i) que corresponde al punto donde se encuentra el dátum vertical, y a partir de esto, calculó la diferencia que existe con respecto al geoide (W_0). Esta diferencia y mediante cálculos, permitirá que la Red de Control Básico Vertical, se enlace al Sistema de Referencia Internacional para las Alturas (IHRN, por sus siglas en inglés), lo que permitirá conocer las alturas de carácter físico referidas a un dátum global. En esta investigación, se determinaron alturas con características geométricas, referidas al nivel medio del mar, pero la metodología propuesta se puede aplicar en la obtención de alturas de carácter físico y enlazadas al IHRN.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

Se generó el mapa de zonificación de gradiente de ondulación geoidal con cinco zonas homogéneas de variación (baja, ligeramente suave, suave, moderada y fuerte). Las zonas con variación baja se ubican, por lo general, en planicies de la costa, el oriente y el callejón interandino, mientras que las zonas con mayor variación se ubican en las estribaciones de las cordilleras presentes en el país. Cada una de estas zonas, delimita el área hasta donde se puede nivelar mediante el uso de GPS, en función al error del método propuesto y considerando la distancia a la base (placa de nivelación IGM).

Se definió el plan de muestreo de las líneas de nivelación, a partir de la Red de Control Básico Vertical. Se seleccionaron 6 placas base y 30 placas móviles, dentro de las líneas que cumplan con distintos parámetros para el posicionamiento, como que se encuentren en un lugar seguro, alejado de obstrucciones, torres de alta tensión y en lo posible alejado de carreteras transitadas.

Para optimizar tiempos en campo, para el rastreo GPS, se utilizó el tipo de posicionamiento estático rápido por un lapso de 60 minutos, para 30 placas móviles; y, el método estático, con sesiones de mínimo 7 horas, para 6 placas base, garantizando el enlace a la Red Geodésica Oficial del IGM (REGME). Las precisiones alcanzadas en posicionamiento GNSS fue del orden centimétrico.

El método de nivelación GPS, permite obtener alturas referidas al nivel medio del mar (oficiales en el Ecuador), a partir del uso de alturas niveladas IGM, alturas elipsoidales, derivadas del posicionamiento satelital, y ondulaciones geoidales (EGM08). El error que presenta este método depende de la distancia a la placa base IGM, con una relación directamente proporcional entre error y distancia a la base.

Los menores errores del método pertenecen a las placas niveladas en la zona 1 de variación de ondulación geoidal, mientras los errores mayores corresponden a la zona 5, lo

que justifica, la definición de las zonas homogéneas de variación de ondulación geoidal, realizada, en este estudio.

Con respecto a la hipótesis planteada, de que el método de nivelación GPS, permite obtener errores menores a 15 cm., en la determinación de alturas referidas al nivel medio del mar, se obtuvo que, para la zona 1, se puede alcanzar este error a distancias menores a 14 km.; para la zona 2 a 13 Km., para la zona 3 a 11 Km, para la zona 4 a 10 Km.; y, para la zona 5 a 8 km.

5.2 Recomendaciones

Se recomienda el uso del método de nivelación GPS, para distintos trabajos que requieran altura referida al nivel medio del mar, considerando los errores de esta técnica, en función de la distancia de nivelación y la zona de variación de ondulación geoidal.

La precisión del método también depende de la calidad del posicionamiento GNSS, por lo que se recomienda que los puntos a nivelar cumplan con buenas condiciones de observación satelital.

Se recomienda al Instituto Geográfico Militar, considere a este método no convencional, en la determinación de altura sobre el nivel medio del mar, como alternativa a la nivelación geométrica tradicional, considerando la optimización de recursos técnicos, logísticos y financieros.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Altamimi, Z., Rebischung, P., Metivier, L., & Collilieux, X. (2016). ITRF2014: A new release of the International Terrestrial Reference Frame modeling nonlinear station motions. *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 121. doi:doi:10.1002/2016JB013098.

Barahona, C. (2016). Metodología para la determinación del cuasigeoide en el Ecuador continental aplicando la teoría de Molodensky. Sangolquí: Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE.

Blanco, M. (2010). Comparativa Altimetría GPS+Geoide EGM08 Frente a Nivelación Geométrica en Obra Lineal. Salamanca: Escuela Politécnica de Ávila.

Cañizares, C. (2015). Análisis del Sistema de Alturas para la Red de Control Básico Vertical del Ecuador. Sangolquí: Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE.

Carrión Sánchez, J. L. (2013). Generación de una malla de ondulaciones geoidales por el método gps/nivelación y redes neuronales artificiales a partir de datos dispersos. La Plata : Universidad Nacional de La Plata.

Carrión, J. (2017). Vínculo do Datum Vertical Equatoriano ao International Height Reference System - *IHRS* . Curitiba.

Cazanave, A., Palanisamy, H., & Ablail, M. (2018). Contemporary sea level changes from satellite altimetry: What have we learned? *Advances in Space Research*.

Cedeño, U. (2015). Implantación de un Red de Control Geodésica Enlazados a la REGME del IGM. Guayaquil: Escuela Politécnica del Litoral.

Consejo Supremo de Gobierno. (4 de Agosto de 1978). Ley de Cartografía Nacional. Obtenido de http://www.igm.gob.ec/work/files/LOTAIP_2014/pdf/leycartografianacional.pdf

Corchete, V. (2009). Geodesia Geométrica y Geodesia Física: Objetivo y Aplicaciones.

Dalda, A., González, F., Cano, M., Sánchez, J., & Pérez, M. (2008). Curso Avanzado de Posicionamiento por Satélites. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.

de Freitas, S. (2015). SIRGAS-WGIII activities for unifying height systems in Latin America. *Revista Cartográfica*.

de Freitas, S., & Blitzkow, D. (1999). Altitudes e geopotencial. Obtenido de [fct.unesp.br: http://www2.fct.unesp.br/docentes/cartogalera/FGL/Altitude-e-Geopotencial.pdf](http://www2.fct.unesp.br/docentes/cartogalera/FGL/Altitude-e-Geopotencial.pdf)

ESRI. (2016). Cómo funciona Pendiente. Obtenido de <http://desktop.arcgis.com>

Fisher, P., & Tate, N. (2006). Progress in Physical Geography: Causes and consequences of error in digital elevation models. *SAGE Publication*, 467 - 489.

Flury, J. (2016, June). Relativistic geodesy. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 723, No. 1, p. 012051). IOP Publishing.

Furones, A. (2011). *Sistema y Marco de Referencia Terrestre*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.

García, F. (1994). *Curso Básico de Topografía*. México D.F.: Árbol Editorial, S.A.

Geoportal IGM. (sf). Red GNSS de Monitoreo Continuo del Ecuador - REGME. Obtenido de <http://www.geoportaligm.gob.ec>

GPS. (2018). Información gubernamental oficial de Estados Unidos sobre el Sistema de Posición Global. Obtenido de <https://www.gps.gov>

Heiskanen, W., & Helmut, M. (1967). *Physical Geodesy*. San Francisco y Londres: W. H. Freeman.

Heiskanen, W., & Moritz, H. (1985). *Geodesia Física*. Madrid: Instituto Geográfico Nacional.

Henriques, M., & Casaca, J. (2016). Monitoring vertical displacements by means of geometric levelling. *Revista de Guimarães*, 403 - 412.

Huerta, E., Mangiaterra, A., & Noguera, G. (2005). GPS: posicionamiento satelital. Rosario: UNR Editora- Universidad Nacional de Rosario.

IAG. (Abril de 2010). The International Association of Geodesy. Obtenido de http://www.iag-aig.org/templates_img/iagbooklet.pdf

IGM. (17 de mayo de 2006). Especificaciones técnicas generales para la realización de cartografía topográfica a cualquier escala. Obtenido de [igm.gob.ec: http://www.igm.gob.ec/work/files/downloads/especcarto3.html](http://www.igm.gob.ec/work/files/downloads/especcarto3.html)

IGM. (2009). Red de Control Básico Vertical. Obtenido de <http://www.geoportaligm.gob.ec>

IGM. (2015). Centro de Procesamiento de Datos GNSS del Ecuador.

Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (2007). Sistema de posicionamiento global - gps. En i. G. Codazzi, sistema de posicionamiento global - gps. La Guajira.

Introcaso, A. (2006). Geodesia Física. Boletín del Instituto de Fisiografía y Geología.

Jekeli, C. (2006). *Geometric Reference Systems in Geodesy*. Ohio: Ohio State University.

Jiang, B. (2013). Head/tail breaks: A new classification scheme for data with a heavy-tailed distribution. *The Professional Geographer*, 65(3), 482-494. doi:<https://doi.org/10.1080/00330124.2012.700499>

Kaplan, E. D., & Hegarty, C. J. (2006). *Understanding GPS Principles and Applications*. Londres: Artech House. Obtenido de *GPS System Segments*.

Kenyeres, A. (2016). GPS/Leveling. Switzerland: E.W. Grafarend, *Encyclopedia of Geodesy*.

LEICA GEOSYSTEMS. (2003). Guía para mediciones en modo Estático y Estático Rápido. Obtenido de http://www.utdallas.edu/~aiken/LEICA/Documentation/Spanish/Static-Rapid_3_0es.pdf

Leiva, C. (2014). Determinación de Modelos de Predicción Espacial de la Variable Ondulación Geoidal, Utilizando Técnicas Geoestadísticas. Quito: Escuela Politécnica Nacional.

Longley, P., Goodchild, M., Maguire, D., & Rhind, D. (s.f.). *Geographic Systems Science*.

Martínez, W. (2010). El Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas SIRGAS: Ejemplo de cooperación basado en GNSS. III Seminario de Geomática. Bogotá.

Naciones Unidas. (2015). Marco de Referencia Geodésico para el Desarrollo Sostenible. Informe del Consejo Económico y Social.

NGA. (2013). National Geospatial-Intelligence Agency. Obtenido de Earth Gravitational Model 2008: <http://earth-info.nga.mil/GandG/wgs84/gravitymod/egm2008/>

Oropeza, O. (2010). Pendiente del Terreno. México: Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático.

Paredes, C., Salinas, W., Martínez, X., & Jiménez, S. (2013). Evaluación y comparación de métodos de interpolación determinísticos y probabilísticos para la generación de modelos digitales de elevación. *Investigaciones Geográficas*, 118 - 130.

Paredes, M. (2013). Procesamiento PPP de observaciones GNSS utilizando software libre Rtklib. Obtenido de [es.scribd.com: https://es.scribd.com/doc/238464273/Procesamiento-Ppp-de-Observaciones-Gnss-Utilizando-Software-Libre-Rtklib](https://es.scribd.com/doc/238464273/Procesamiento-Ppp-de-Observaciones-Gnss-Utilizando-Software-Libre-Rtklib)

Paredes, N. (1986). Determinación del Dátum Vertical en La Libertad, Ecuador. *Acta Oceanográfica del Pacífico*, 205-209.

Pavlis, N., Holmes, S., Kenyon, S., & Factor, J. (2012). The development and evaluation of the Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008). *Journal of Geophysical Research: Solid Earth (1978-2012)*, 117.

Ramilién, G., Frappart, F., & Seoane, L. (2017). Space Gravimetry Using GRACE Satellite Mission: Basic Concepts. *Microwave Remote Sensing of Land Surfaces*, 285 - 302.

Rapp, R. (1991). *Geometric Geodesy*.

Sánchez, L. (2002). Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas, Boletín Informativo N° 6.

Sánchez, L., & Martínez, W. (1997). Guía Metodológica para la Obtención de Alturas Sobre el Nivel Medio del Mar Utilizando el Sistema GPS. Instituto Geográfico Agustín Codazzi.

Santacruz, A. (2015). Integración de las Redes Verticales Sudamericanas: Inventario en Vista de los Términos de Referencia de SIRGAS/GGOS. Curitiba: Universidad Federal de Paraná.

Seeber, G. (2003). *Satellite Geodesy*. Berlín: Hannover University.

Sevilla de Lerma, M. (2012). Historia de Matemáticas: Introducción Historica a la Geodesia. *Pensamin Matematic*.

Thompson, P., Hamlington, F., Landerer, F., & Adhikari, S. (2016). Are long tide gauge records in the wrong place to measure global mean sea level rise? *Geophysical Research Letters*.

Tierra, A. (2009). Evaluación del EGM08 y EGM96 en el Ecuador a partir de Datos de GPS y Nivelación Geométrica. *Geoespacial 06*, 72-80.

Tierra, A., & Acurio, V. (2016). Modelo Neuronal para la Predicción de la Altura Geoidal Local en el Ecuador. *Geoespacial*, 59-72.

Torge, W. (2001). *Geodesy*. Berlin: Walter de Gruyter.

Zakatov, P. (1997). *Curso de Geodesia Superior*. Madrid: Rubiños.

Zurita, P. (sf). Adopcion del nuevo Marco de Referencia para el Ecuador. Obtenido de [sirgas.org](http://www.sirgas.org):

http://www.sirgas.org/fileadmin/docs/Boletines/Bol15/37a_Zurita_et_al_Reporte_Ecuador.PDF

ANEXOS

**ANEXO 1: MODELO DIGITAL DE ONDULACIÓN GEOIDAL EGM08 DEL
ECUADOR CONTINENTAL (FORMATO DIGITAL - .TIF - SIG)**

**ANEXO 2: MODELO DIGITAL DE GRADIENTE DE ONDULACIÓN GEOIDAL
DEL ECUADOR CONTINENTAL (FORMATO DIGITAL - .TIF - SIG)**

**ANEXO 3: INSUMOS DEL PLAN DE MUESTREO DE PLACAS
COMPONENTES RED DE CONTROL BÁSICO VERTICAL DEL IGM (FORMATO
DIGITAL)**

**ANEXO 4: MEMORIA TÉCNICA DEL TRABAJO DE CAMPO DEL
POSICIONAMIENTO GPS (FORMATO DIGITAL)**

**ANEXO 5: INFORMES DE PROCESAMIENTO DE DATOS GPS EN EL
SOFTWARE TRIMBLE BUSINESS CENTER**

**ANEXO 6: ELENCO DE COORDENADAS DE TODOS LOS SITIOS
MUESTREADOS DEL PAÍS**