



UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY



FACULTAD DE
INGENIERÍA
UDELAR

Calidad Posicional de Imágenes Georreferenciadas y MDT

Gastón Würth Troche
Valentín Juárez Pérez

.....

Proyecto de grado presentado en Facultad de Ingeniería de la Universidad de la
República

En cumplimiento parcial de los requerimientos para la obtención del título de
Ingeniero Agrimensor

Tutor/es

Jorge Faure
Fernanda Camisay

Tribunal

Luis Calderón
Roberto Pérez
Esteban Striwe

Montevideo, Uruguay
2022

A nuestras familias y amigos, por el apoyo a lo largo de todos estos años e hicieron esto posible.

RESUMEN

En el presente trabajo se busca analizar la calidad posicional de ortomosaicos y MDT generados a partir del vuelo fotogramétrico nacional 2017/18. Se realizan mediciones de campo mediante métodos GNSS-RTK, y se comparan los puntos medidos con sus homólogos extraídos de los modelos, calculando los intervalos de confianza al 95% y aplicando el estadístico NSSDA.

Previamente se compararon 3 metodologías de levantamiento RTK utilizadas en el ámbito laboral de un Ing. Agrimensor, tomando como referencia de mayor precisión puntos calculados por método Estático. Este estudio permite elegir correctamente un método de levantamiento GNSS para realizar el control posicional.

Finalmente se compara el MDT de la IDEuy con su predecesor MDT de la RENARE y uno Global, incluyendo un ensayo en el cálculo de una cuenca.

PALABRAS CLAVE: Calidad Posicional, Topografía, Geodesia, Sistemas de Referencia, MDT, IDEuy.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1 - Calidad posicional de imágenes georreferenciadas y MDT.....	11
1.1 INTRODUCCIÓN.....	11
1.2 OBJETIVOS.....	12
1.2.1 Objetivos Generales.....	12
1.2.2 Objetivos específicos.....	12
1.3 ESTADO DEL ARTE.....	13
1.3.1 “Control de Precisión Posicional de la Cartografía Base de la Intendencia Municipal de Montevideo - Uruguay.”.....	13
1.3.2 “Control de Exactitud Planialtimétrica de MDT y Comparación de Modelos Topográficos en una Centralidad de Ciudad del Plata: apoyo al estudio de escurrimiento superficial”.....	14
1.3.3 “Control de Calidad Posicional de Cartografía Digital con Métodos Estadísticos, según normas ISO 19100”.....	15
1.3.4 “Estudio de las Exactitudes obtenidas en Relevamientos GNSS-RTK mediante VRS y DGNSS”.....	16
CAPÍTULO 2 - Marco Teórico.....	17
2.1 GEODESIA.....	17
2.1.1 Introducción a la Geodesia.....	17
2.1.2 Marco y Sistema de Referencia.....	18
2.1.3 Sistemas de Tiempos.....	21
2.1.4 Conversión de Coordenadas.....	21
2.1.5 Sistema de Altura.....	22
2.1.6 Sistema Global de Navegación Satelital: GNSS.....	24
2.1.7 Técnicas de Medición GNSS.....	26
2.1.8 Solución de Red.....	30
2.1.9 Errores en el Posicionamiento GNSS.....	31
2.2 Cartografía.....	34
2.2.1 Introducción a la Cartografía.....	34
2.2.2 Proyección Cartográfica.....	34
2.2.3 Proyección Universal Transversal Mercator (UTM).....	36
2.3 Fotogrametría.....	39
2.3.1 Introducción a la Fotogrametría.....	39
2.3.2 Ortoimagen.....	40

2.3.3 Modelo digital del terreno (MDT)	41
2.4 Teoría de Errores y Estadística	42
2.4.1 Introducción a la Teoría de Errores.....	42
2.4.2 Introducción a la Estadística	43
2.4.3 Estadística inferencial	45
2.4.4 Tratamiento de una muestra de observaciones.....	47
2.5 Control de la exactitud posicional.....	49
2.5.1 Introducción a la exactitud posicional	49
2.5.2 Estándar NSSDA	51
CAPÍTULO 3 - Marco Metodológico y Campaña de Medición.....	53
3.1 METADATOS DE LOS PAQUETES DE DATOS	53
3.1.1 Imágenes satelitales y MDT de la IDEuy	53
3.1.2 MDT del MGAP-RENARE	54
3.1.3 MDT Global.....	55
3.2 ZONA DE ESTUDIO	56
3.2.1 Elección de la Zona de estudio	56
3.3 PLANIFICACIÓN DEL TRABAJO DE CAMPO.....	57
3.3.2 Métodos de observación.....	58
3.3.3 Equipos de medición.....	59
3.3.4 Muestra Poblacional.....	60
3.3.5 Tratamiento	66
CAPÍTULO 4 - Exposición de Resultados	68
4.1 Trabajo de Campo.....	68
4.1.1 Primer Estudio: Comparativa de técnicas GNSS para determinar los puntos de apoyo	68
4.1.2 Segundo Estudio: Evaluación de la calidad posicional.....	73
4.2 Procesamiento de los datos	80
4.2.1 Primer Estudio	80
4.2.2 Segundo Estudio	85
4.2.3 Comparación de los Modelos Digitales de Terreno	101

CAPÍTULO 5 - Conclusiones Finales	115
5.1 Conclusiones Generales	115
5.2 Conclusiones Específicas.....	116
CAPÍTULO 6 - Referencias Bibliográficas	118
6.1 BIBLIOGRAFÍA	118

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO 1 - Calidad posicional de imágenes georreferenciadas y MDT.....	11
Figura 1.3.1 - Distribución de los puntos GNSS en Montevideo.....	13
Figura 1.3.2 - Caminamiento y Distribución de los Puntos GNSS relevados.....	14
Figura 1.3.3 - Distribución de los Puntos GNSS en el depto. de Pocitos.	15
Figura 1.3.4 - Comparación de exactitudes y sus respectivos valores promedios.	16
CAPÍTULO 2 - Marco Teórico.....	17
Figura 2.1.1 - Representación de la Tierra mediante diferentes superficies.	17
Figura 2.1.2 - Estaciones de Referencia de Observación Continua en Uruguay.	20
Figura 2.1.3 - Coordenadas Geodésicas y Cartesianas geocéntricas.....	22
Figura 2.1.4 - Relación entre la altura Ortométrica y Elipsoidal.	23
Figura 2.1.5 - Desviación de la vertical.	23
Figura 2.1.8 - Métodos de Observación GNSS.	27
Figura 2.1.9 - Posicionamiento Diferencial.	28
Figura 2.1.10 - Relación Línea Base y Tiempo de Obs. en Posicionamiento Relativo-Estático. ..	29
Figura 2.1.11 - Solución de Red.	30
Figura 2.1.12 - Comportamiento de la onda electromagnética en la atmósfera.	32
Figura 2.1.13 - Comportamiento del error asociado a la disposición geométrica de los satélites.	33
Figura 2.2.1 - Representación de la proyección UTM - Representación de la proyección UTM.	36
Figura 2.2.2 - Convergencia plana de meridianos UTM.....	37
Figura 2.2.3 - Isoconvergencia γ de los meridianos para la proy. UTM en Uruguay.	37
Figura 2.2.4 - Isodeformación lineal k de los meridianos para la proy. UTM en Uruguay.	38
Figura 2.3.1 - Deformaciones geométricas.	40
Figura 2.3.2 - Proceso de ortorectificación.	41
Figura 2.4.1 - Diferentes distribución de diagramas de dispersión.	44
Figura 2.4.2 - Distribución Normal con diferente valores de μ y σ	45
Figura 2.4.3 - Fracción de tabla tabulada de la distribución Normal(0,1).	46
Figura 2.4.4 - Cuadro de valores de Chauvenet.....	48
Figura 2.4.5 - Representación de la distancia D_i	48
Figura 2.4.6 - Valores límites de Kolmogorov-Smimov para un 95% de nivel de confianza.	49
Figura 2.5.1 - Representación de la distribución muestral recomendada.....	51

CAPÍTULO 3 - Marco Metodológico y Campaña de Medición.....	53
Figura 3.1.1 - Visualizador de la IDEuy.	53
Figura 3.1.2 - Servicios de Página Web del MGAP.	54
Figura 3.1.3 - Visualizador Land Viewer.	55
Figura 3.2.1 - Ubicación de la ciudad de Nueva Helvecia, Colonia.	56
Figura 3.2.2 - Ubicación de la ciudad de Fraile Muerto.	57
Figura 3.3.1 - Receptores GNSS + equipo radio utilizado.....	60
Figura 3.3.22 - Controladora GNSS utilizada.....	60
Figura 3.3.3 - Puntos de apoyo (izquierda) y control (derecha), ciudad de Nueva Helvecia.....	61
Figura 3.3.4 - Muestra de puntos para la Zona I.	61
Figura 3.3.5 - Puntos de apoyo y control, ciudad de Fraile Muerto.....	62
Figura 3.3.6 - Muestra de puntos para la Zona II.....	62
Figura 3.3.7 - 130 puntos Fotoidentificables/66 Puntos seleccionados por MAS, para la Zona I.	64
Figura 3.3.8 - Caminamiento del Relevamiento para la Zona I.	65
Figura 3.3.9 - 200 puntos Fotoidentificables/60 Puntos seleccionados por distancia a una malla.....	65
Figura 3.3.10 - Caminamiento del Relevamiento para la Zona I.	66
CAPÍTULO 4 - Exposición de Resultados	68
Figura 4.1.1 - Ubicación de la base auxiliar para la Zona I.	68
Figura 4.1.2 - Puntos pertenecientes a la muestra comparativa.	69
Figura 4.1.3 - Base Auxiliar en la Zona II.	71
Figura 4.1.4 - Puntos pertenecientes a la muestra comparativa en la ZONA II.....	71
Figura 4.1.5 - Puntos pertenecientes a la muestra en la Zona I.....	74
Figura 4.1.6 - Punto 39 modificado de la muestra en la Zona I.....	74
Figura 4.1.7 - Puntos pertenecientes a la muestra en la Zona II.	77
Figura 4.1.8 - Punto 48 modificado de la muestra en la Zona II.....	77
Figura 4.2.1 - Gráfica de barra promedio de desviaciones para la Zona I.	82
Figura 4.2.2 - Gráfica de barra promedio de desviaciones para la Zona II.....	84
Figura 4.2.3 - Correlación de Pearson, Zona I.	88
Figura 4.2.4 - Test de Normalidad para la variable ΔE , Zona I.	89
Figura 4.2.5 - Histograma para la variable ΔE y Normal ajustada, Zona I.....	89
Figura 4.2.6 - Test de Normalidad para la variable ΔN , Zona I.....	90
Figura 4.2.7 - Histograma para la variable ΔN y Normal ajustada, Zona I.	90

Figura 4.2.8 - Test de Normalidad para la variable ΔH , Zona I.....	91
Figura 4.2.9 - Histograma para la variable ΔH y Normal ajustada, Zona I.	91
Figura 4.2.10 - Correlación de Pearson, Zona II.....	96
Figura 4.2.11 - Test de Normalidad para la variable ΔE , Zona II.....	97
Figura 4.2.12 - Histograma para la variable ΔE y Normal ajustada, Zona II.....	97
Figura 4.2.13 - Test de Normalidad para la variable ΔN , Zona II.	98
Figura 4.2.14 - Histograma para la variable ΔN y Normal ajustada, Zona II.	98
Figura 4.2.15 - Test de Normalidad para la variable ΔH , Zona II.	99
Figura 4.2.16 - Histograma para la variable ΔH y Normal ajustada, Zona II.	99
Figura 4.2.17 - Comparación Datos de Campo y modelo IDEuy.	102
Figura 4.2.18 - Comparación Datos de Campo y modelo RENARE.....	103
Figura 4.2.19 - Comparación modelos IDEuy - RENARE.....	104
Figura 4.2.20 - Comparación Datos de Campo y modelo Global.....	105
Figura 4.2.21 - Comparación modelos IDEuy - GLOBAL.....	106
Figura 4.2.22 - Comparación Datos de Campo y modelo IDEuy.....	107
Figura 4.2.23 - Comparación Datos de Campo y modelo RENARE.....	108
Figura 4.2.24 - Comparación modelos IDEuy - RENARE.....	109
Figura 4.2.25 - Comparación Datos de Campo y modelo Global.....	110
Figura 4.2.26 - Comparación modelos IDEuy - GLOBAL.....	111
Figura 4.2.27 - Cuencas en Zona I.....	112
Figura 4.2.28 - Cuencas en Zona II.....	113

ÍNDICE DE TABLAS

CAPÍTULO 4 - Exposición de Resultados	68
Tabla 4.1.1 - Resultados de Campo en la Zona I, para el 1er. Estudio.	70
Tabla 4.1.2 - Resultados de Campo en la Zona II, para el 1er. Estudio.	73
Tabla 4.1.3 - Posicionamiento de Campo en la Zona I, para el 2º Estudio.	76
Tabla 4.1.4 - Posicionamiento de Campo en la Zona II, para el 2º Estudio.	79
Tabla 4.2.1 - Diferenciales parciales de las observaciones para la Zona I.	81
Tabla 4.2.2 - Promedio de desviaciones para la Zona I.	81
Tabla 4.2.3 - Diferenciales parciales de las observaciones para la Zona II.	84
Tabla 4.2.4 - Promedio de desviaciones para la Zona II.	84
Tabla 4.2.5 - Posicionamiento de los puntos para el 2do. Estudio. Zona I.	86
Tabla 4.2.6 - Desviaciones de los puntos de la muestra, Zona I.	87
Tabla 4.2.7 - Posicionamiento de los puntos para el 2do. Estudio. Zona II.	94
Tabla 4.2.8 - Desviaciones de los puntos de la muestra, Zona II.	95
Tabla 4.2.9 - Diferencia de área entre cuencas.	112
Tabla 4.2.10 - Diferencia de áreas entre cuencas.	113

CAPÍTULO 1 - Calidad posicional de imágenes georreferenciadas y MDT

1.1 INTRODUCCIÓN

El presente proyecto de grado se enmarca en las actividades para culminar la carrera Agrimensura (Plan 1997), dictada por Facultad de Ingeniería, Universidad de la República. En esta redacción se documenta el trabajo realizado por los integrantes que lo presentan, así como los resultados obtenidos y su análisis.

En la realización de un anteproyecto para una obra de ingeniería, como el trazado de una ruta, represa de agua, entre otros, con el fin de reducir costos en una etapa inicial y evitar extensos relevamientos, se utiliza información digital existente. Esto incluye hoy día, imágenes satelitales, fotografías aéreas y modelos digitales de terreno (MDT), entre otras.

En lo que respecta a este proyecto de grado, en particular se busca estudiar la precisión asociada a los modelos digitales de la IDEuy¹, y establecer el alcance o potencial que este brinda. Con este objetivo se realizan observaciones sobre el terreno de forma directa mediante tecnología GNSS, en dos zonas de estudio: Fraile Muerto (Cerro Largo) y Nueva Helvecia (Colonia).

Previo a esto, se propone como objetivo secundario, realizar una comparación de distintos métodos de observación por GNSS y determinar cuál/es metodología/s utilizar en este trabajo.

Adicionalmente se realiza una comparación de modelos digitales de elevaciones, incluyendo los MDT de la IDEuy, RENARE² y uno de carácter GLOBAL.

¹ Infraestructura de Datos Espaciales de Uruguay: <https://visualizador.ide.uy/>

² Dirección de Recursos Naturales Renovables: <http://web.renare.gub.uy/sitio/aplicaciones.html>

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivos Generales

El trabajo se enfoca en evaluar la calidad geométrica de los modelos de la IDEuy realizados a partir del Vuelo Nacional 2017-2018, considerando los productos ortoimagen y MDT referentes a áreas preestablecidas, Nueva Helvecia (Colonia) y Fraile Muerto (Cerro Largo). Para ello, se comparan datos extraídos de estos modelos geográficos con datos equivalentes procedentes de observaciones directas realizadas en campo.

Al desarrollar la temática expuesta, surgen objetivos secundarios, que aún sin profundizarlos, presentan contenido de interés que sirven para el futuro actuar de un Ing. Agrimensor y por ende son presentados en esta redacción.

1.2.2 Objetivos específicos

- Cuantificar la exactitud geométrica de los modelos digitales de la IDEuy 2017-2018 sobre las zonas de estudio seleccionada.
- Comparar metodologías de posicionamiento diferencial GNSS:
 - Estático-Rápido con base propia.
 - RTK con base propia.
 - RTK corrección vía NTRIP con bases permanentes del IGM.
 - RTK corrección vía NTRIP utilizando VRS.
- Comparar el MDT de la IDEuy con su antecesor MDT-RENARE y un MDT global.

1.3 ESTADO DEL ARTE

Se realiza una búsqueda de publicaciones académicas que sirvan de antecedentes para el presente trabajo. Si bien no presentan objetivos idénticos, se hallan documentos relacionados, como estudios de precisión posicional en cartografía, así como análisis prácticos de metodologías GNSS.

1.3.1 “Control de Precisión Posicional de la Cartografía Base de la Intendencia Municipal de Montevideo - Uruguay.” M. Sc. Ing. Fabián D. Barbato (2004)³.

Desarrolla conceptos teóricos para el control de la calidad de mapas y expone el uso de un software específico para la determinación de precisiones geométricas y topológicas. Para ello, utiliza testeos estadísticos y determina algoritmos capaces de producir parámetros de aceptación o rechazo de la cartografía 1:1000, base del “Montevimap”. Incluye captura de puntos GNSS en campo, así como el uso de cartografía digital para la extracción y comparación de puntos homólogos.

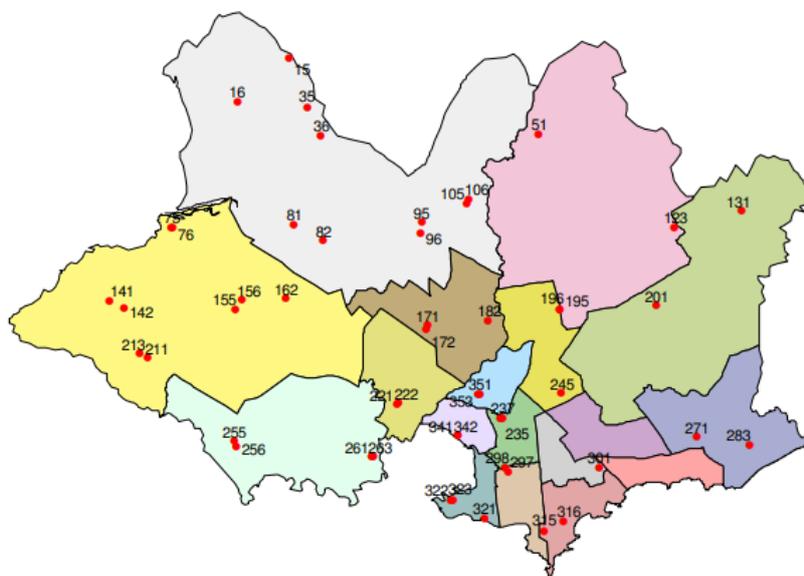


Figura 1.3.1 - Distribución de los puntos GNSS en Montevideo.

De los casi 80 puntos relevados, 51 son utilizados en los procesos estadísticos, luego de depurada la muestra. Obtiene como resultado un vector 2D, diferencia entre las posiciones de las entidades en el mapa y sus homólogos en terreno, de 2.33m para el 95% de los casos.

³ http://intgis.montevideo.gub.uy/sit/data/otros_doc_y_proy/MRGMVD2004_barbato_gc_cartog.pdf

1.3.2 “Control de Exactitud Planialtimétrica de MDT y Comparación de Modelos Topográficos en una Centralidad de Ciudad del Plata: apoyo al estudio de escurrimiento superficial”.

Facultad de Ingeniería. Uruguay. Katherine Lesparre (2020).⁴

Este proyecto se desarrolla en los barrios de Playa Pascual y Villa Olímpica, en Ciudad del Plata, San José. Tiene como objetivo presentar insumos para el diseño de drenaje pluvial, comparando diferentes metodologías de levantamiento de datos.

Para ello se propone cuantificar la exactitud posicional planialtimétrica del modelo urbano de la IDE para esa zona, mediante el estándar NSSDA y un relevamiento de campo de 100 puntos GNSS. Además de elaborar un MDT mediante un vuelo de VANT y comparar este con el de la IDE, tanto en altimetría como en pendientes.



Figura 1.3.2 - Caminamiento y Distribución de los Puntos GNSS relevados.

De los casi 100 puntos relevados, 87 son utilizados en los procesos estadísticos planimétricos y 95 en los altimétricos, luego de depurar la muestra. Como resultado se obtiene (al 95% de nivel de confianza) un error de exactitud de 0,26 m en horizontal y 0,32 m en vertical.

Al comparar las diferencias de cota entre el MDE de IDE y el de VANT, sin incluir áreas arboladas o edificadas, se tratan de productos muy similares con una media centimétrica. No así cuando se utiliza el MDE completo, debido a la mala clasificación de las zonas arboladas por parte del vuelo VANT, y la urbanización posterior al modelo de la IDE.

⁴ <https://www.colibri.udelar.edu.uy/jspui/bitstream/20.500.12008/23852/1/Les20.pdf>

1.3.3 “Control de Calidad Posicional de Cartografía Digital con Métodos Estadísticos, según normas ISO 19100”. Facultad de Ingeniería. Argentina. K. Albagli y B. Martín (2018).⁵

Se propone controlar la calidad posicional planialtimétrica de productos cartográficos de Pocitos en la provincia de San Juan, Argentina. Basándose en normas ISO 19100, mediante el uso de métodos estadísticos, relevamiento GNSS y el cálculo de los estadísticos EMAS y NSSDA.

De los 38 puntos de control (observados mediante el método Estático-Rápido, utilizando 3 puntos de la Red Rural de la provincia de San Juan como puntos auxiliares), 26 son utilizados en los procesos estadísticos planimétricos y 34 en los altimétricos, luego de depurada la muestra.

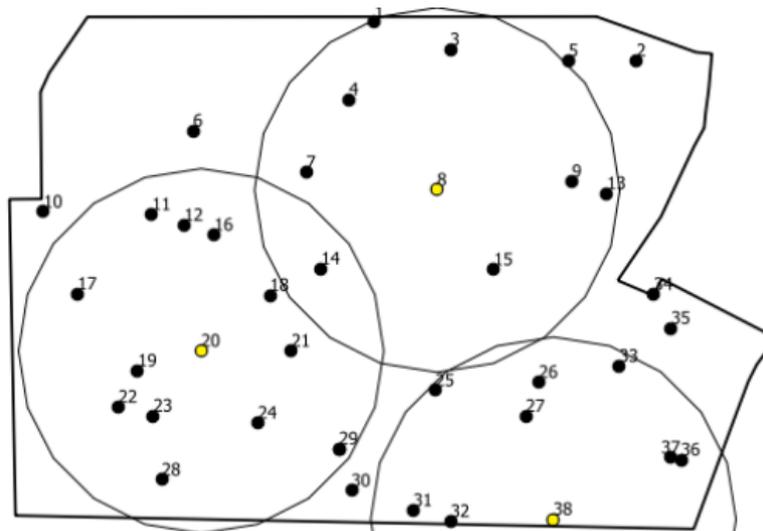


Figura 1.3.3 - Distribución de los Puntos GNSS en el depto. de Pocitos.

Se verifican (al 95% de confianza) las siguientes exactitudes:

- En Planimetría, un error de 2,93m según el NSSDA y 2,60m fijado por el EMAS.
- En Altimetría, un error de 1,96m según el NSSDA y 2,60m fijado por el EMAS.

Se concluye que el estándar EMAS es más restrictivo que el NSSDA. En el primero se establece si la calidad de la carta pasa o no los test estadísticos, y en el segundo se obtiene el valor de la precisión de la misma quedando sujeta al análisis del consumidor, en función de sus aplicaciones. Ambos estándares están contemplados en la norma de calidad ISO 19138.

⁵ <https://n9.cl/cscpcme-albagli-martin>

1.3.4 “Estudio de las Exactitudes obtenidas en Relevamientos GNSS-RTK mediante VRS y DGNSS”. Facultad de Ingeniería. Uruguay. Nicolas Rimoli y Pablo Secco (2017).⁶

El trabajo tiene como objetivo determinar las exactitudes derivadas de aplicar la solución de red VRS en tiempo real, y las obtenidas al trabajar con base-líneas simples mediante el protocolo NTRIP. Para ello, se conforma una red de puntos base medidos por método Estático, 4 de primer orden (medidos por 3hr) y 16 de segundo orden (medidos por 30min) determinados por post-proceso. Posteriormente se realizan las observaciones DGNSS y VRS de la muestra, variando los tiempos de ocupación. Una vez depurada la misma, se obtienen los siguientes resultados:

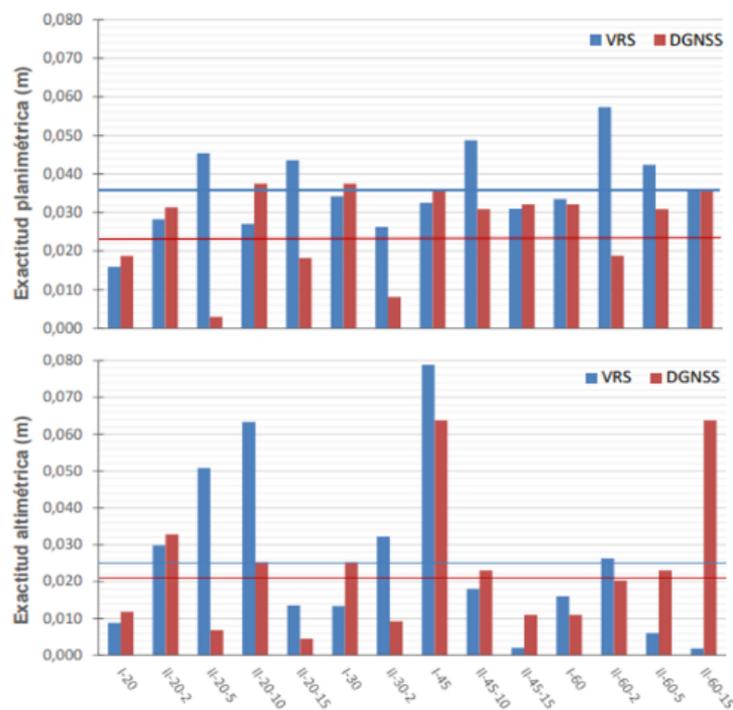


Figura 1.3.4 - Comparación de exactitudes y sus respectivos valores promedios.

Al comparar las observaciones en función del tiempo de medición, tanto para el método VRS como DGNSS, no se logra verificar una mejoría de exactitud a mayor tiempo de ocupación. Esto se debe a la poca diferencia entre los tiempos de medición comparados (máximo 28s).

Al comparar las observaciones en función de la distancia base-receptor, tampoco se logra verificar una mejoría de la exactitud a menor distancia, para ninguno de los dos métodos (considerando distancias de hasta 15km en VRS y 60km en DGNSS).

Se determina la exactitud en planimetría de 0.036m para VRS y 0.023m para DGNSS, y en altimetría 0.025m y 0.021m, respectivamente; exactitudes similares con desviaciones centimétricas.

⁶ <https://www.colibri.udelar.edu.uy/jspui/bitstream/20.500.12008/22876/1/RS17.pdf>

CAPÍTULO 2 - Marco Teórico

A continuación, se desarrollan conceptos relacionados a la Geodesia, Cartografía, Estadística y Fotogrametría, de relevancia para el desarrollo y comprensión del presente trabajo.

2.1 GEODESIA

Debido a que la Geodesia define cualidades geométricas de la superficie terrestre, así como metodologías para su correcta medición, es necesario definir algunos conceptos en torno a los métodos de medición a utilizar y sus fundamentos teóricos.

2.1.1 Introducción a la Geodesia

La Geodesia es una de las Ciencias más antiguas, según Alberto Benavidez Sosa, *“Los fines principales de la Geodesia son la determinación de la figura de la Tierra, el posicionamiento de puntos sobre la superficie física terrestre y el estudio del campo de gravedad externo del planeta”*.

La forma de la Tierra ha sido definida de diferentes formas a lo largo de los años, como una superficie plana rodeada de océanos, una superficie esférica (Pitágoras, 570A.C.), y posteriormente un elipsoide de revolución (Isaac Newton siglo XVII). Actualmente, gracias a mediciones geodésicas se ha demostrado que sobre dicha superficie existen variaciones, debido al campo de gravedad.

El geoide es la hipótesis más aceptada de la forma física de la Tierra, se define como una superficie equipotencial del campo de la gravedad terrestre. La materialización aproximada del geoide es la que resulta de la prolongación del nivel medio de los mares por debajo de los continentes, cuya superficie es normal a todas las líneas de fuerza del campo gravitatorio terrestre.

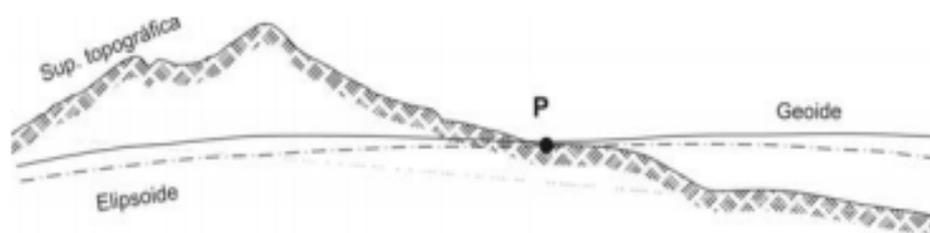


Figura 2.1.1 - Representación de la Tierra mediante diferentes superficies.⁷

Dada la dificultad de determinar el geoide (superficie física), la geodesia define como aproximación una superficie matemática simple, un elipsoide de revolución achatado en los polos.

⁷ Fuente: INTROCASO, Antonio. 2006. “GEODESIA FÍSICA”. Boletín del Instituto Fisiografía y Geología. Rosario, Argentina.

2.1.2 Marco y Sistema de Referencia

Según la bibliografía estudiada, se definen sistema y marco de referencia de la siguiente forma:

“Un sistema de referencia es una definición conceptual de modelos y constantes que sirven como base para la representación de la geometría de la superficie de la Tierra y su variación en el tiempo.” (Ejemplo ITRS).

“Un marco de referencia es un conjunto de puntos físicos, con coordenadas determinadas con precisión en un sistema de coordenadas específico conectado a un sistema de referencia. Es la materialización de un sistema de referencia dado por un conjunto de entidades físicas y matemáticas.” (Ejemplo ITRF08).

“Un sistema de coordenadas, es la parametrización de las coordenadas de los puntos que forman el marco de referencia.” (Ejemplo Coord. Cartesianas, Coord. Geodésicas, Coord. Locales).

Conocer el sistema de referencia de la información espacial, es de vital importancia cuando se trabaja con diversos paquetes de datos de distintos proveedores, dado que este permite unificar la información, estableciendo los parámetros de transformación de coordenadas.

World Geodetic System 1984 (WGS84)

Desarrollado por el Servicio Geográfico de la Armada de Estados Unidos, es el sistema de coordenadas cartesianas de la constelación GPS. Su marco de referencia consiste en satélites, no se encuentra materializado en la superficie terrestre.⁸

El WGS84 se define como:

- Geocéntrico, origen coincidente al centro de masa de terrestre (época 1/1/1984 - hora 0.00).
- La unidad de longitud es el metro, del Sistema Internacional (SI).
- El elipsoide de referencia es el WGS84.
- Orientación de los ejes:
 - Eje Z: coincidente con el eje de rotación (época 1/1/1984 - hora 0.00).
 - Eje X: vector de origen el geocentro que pasa por la intersección del plano ecuatorial con el plano meridiano de Greenwich (época 1/1/1984 - hora 0.00).
 - Eje Y: queda determinado por los anteriores, completando una tripleta de ejes ortogonales entre sí.

⁸ Fuente: BERNÉ, José Luis – Anquela Julián, y otros. 2014. “GNSS: GPS: Fundamentos y aplicaciones en Geomática”. Editorial de la Universidad Politécnica de Valencia, España.

Sistema de Referencia Global, ITRS

El Sistema de Referencia Terrestre Internacional, conocido como ITRS (International Terrestrial Reference System) es definido por el Servicio Internacional de la Rotación Terrestre y los Sistemas de Referencia (IERS), organismo responsable de proporcionar las constantes de referencias para el posicionamiento global.⁹

El ITRS se define como:

- Geocéntrico, origen coincidente con el centro de masa de la Tierra.
- La unidad de longitud es el metro, del Sistema Internacional (SI).
- El elipsoide de referencia es el GRS80.
- Orientación de los ejes:
 - Eje Z: orientado hacia el polo terrestre convencional, coincidente con el eje de rotación.
 - Eje X: vector de origen el geocentro que pasa por la intersección del plano ecuatorial con el plano meridiano de Greenwich.
 - Eje Y: determinado por los anteriores, completando una tripleta de ejes ortogonales.

El Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas (SIRGAS) se define idénticamente al ITRS, surge como producto de la densificación de la red de estaciones GNSS de alta precisión en el área continental. Las coordenadas SIRGAS están asociadas a una época específica de referencia y su variación con el tiempo es también tomada en cuenta.

Al comparar ambos sistemas de referencia, el ITRS y WGS84, se puede observar que se encuentran prácticamente alineados, presentando diferencias a nivel centimétrico.

Marco de Referencia ITRS

El marco de referencia terrestre Internacional, conocido como ITRF (International Earth Rotation Services) es la materialización del ITRS, definido por una red de puntos establecidos sobre la superficie terrestre con sus coordenadas determinadas por diversas técnicas de geodesia satelital.

Se denomina IGS “XX” al marco de referencia GNSS, el cual se determina únicamente de observaciones GNSS, siendo este una singularidad del ITRF “XX”, corresponde al año de referencia de la época de cálculo (por ejemplo, IGS14, refiere a la realización 2014, vinculado a ITRF2014).

Al comparar ambos marcos de referencia en la misma época, se presentan diferencias milimétricas, por ello se consideran alineados o similares.

⁹ Fuente: BERNÉ, José Luis – Anquela Julián, y otros. 2014. “GNSS: GPS: Fundamentos y aplicaciones en Geomática”. Editorial de la Universidad Politécnica de Valencia, España.

2.1.3 Sistemas de Tiempos

Para efectuar correctamente observaciones GNSS, se debe establecer un sistema de referencia de tiempos que relacione los sistemas de referencia terrestres y espaciales.

Se pueden definir los siguientes tipos de tiempo:

- Tiempo Solar: Tiempo transcurrido entre dos pasos del Sol por el meridiano del lugar (24hs).
- Tiempo Sidéreo: Tiempo que tarda la Tierra en girar sobre sí misma, tomando como referencia el punto Aries (23h 56m 4.091s).
- Tiempo Universal (UT): Tiempo el cual es la medición del periodo de rotación de la Tierra, a partir de referencias astronómicas.
- Tiempo atómico internacional (TAI): Es una escala de tiempos uniforme en la Tierra (desligados a la rotación terrestre) y es mantenido por una red de relojes atómicos, el cual cuenta con enorme precisión y estabilidad.
- Tiempo Universal Coordinado (UTC): Tiempo atómico internacional que se mantiene a menos de 0.9 segundos del TAI, debido a la disminución de la velocidad de rotación de la Tierra. A esta variación se la denomina Leap Seconds.
- Tiempo GNSS: Es una escala de tiempo atómica, que no es alterado por Leap Seconds.

Se toma como época de origen para las observaciones GNSS, las 0:00hrs UTC de la noche del 5 al 6 del 01/1980, y se procede a enumerar las semanas GPS en forma correlativa (ciclos de 1024 semanas). Al completar el ciclo GNSS el conteo se reinicia.

Si consideramos el TAI y el UTC, a las 0:00hrs UTC de la noche del 5 al 6 del 01/1980 no presentan ninguna diferencia entre sí, es decir el TAI y el UTC son iguales.

2.1.4 Conversión de Coordenadas

Se denomina conversión de coordenadas al proceso por el cual, se cambia la forma de expresar matemáticamente una posición, sin modificar el marco de referencia relacionado. La transformación de coordenadas es el proceso por el cual se cambia el sistema de referencia de una posición.

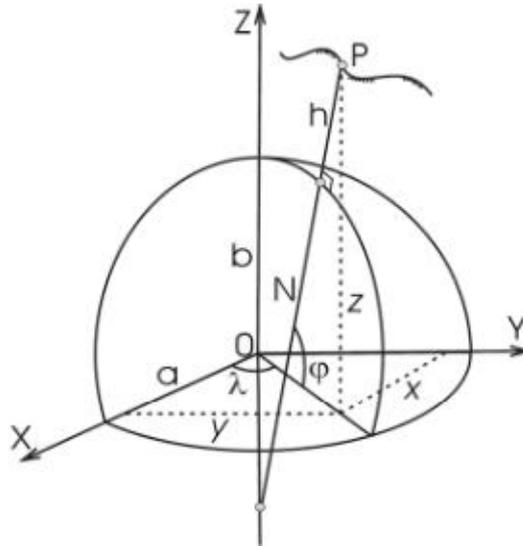


Figura 2.1.3 - Coordenadas Geodésicas y Cartesianas geocéntricas.¹¹

Dado que las coordenadas geodésicas y cartesianas utilizan el mismo sistema de referencia, es posible relacionarlas, mediante la conversión de coordenadas.

Estos sistemas de coordenadas se vinculan por el siguiente sistema de ecuaciones:

$$(i) \quad \begin{cases} X_p = (N + h_p) \cdot \cos(\varphi_p) \cdot \cos(\lambda_p) \\ Y_p = (N + h_p) \cdot \cos(\varphi_p) \cdot \text{sen}(\lambda_p) \\ Z_p = [N \cdot (1 - e^2) + h_p] \cdot \text{sen}(\varphi_p) \end{cases}$$

Dónde: $P(\varphi_p, \lambda_p, h_p)$, corresponde a las coord. geodésicas referidas al punto P.

$P(X_p, Y_p, Z_p)$, corresponde a las coord. cartesianas referidas al punto P.

2.1.5 Sistema de Altura

Para determinar las alturas sobre el nivel medio del mar se han utilizado tradicionalmente métodos de nivelación geométrica, trigonométrica y barométrica, los cuales consumen mucho tiempo de operación, característica que disminuye considerablemente la geodesia satelital.

ALTURA O COTA: Se denomina Cota a la distancia vertical orientada entre la superficie de referencia adoptada y el punto de interés.

- La Cota Ortométrica (H), es la distancia vertical entre la superficie física de la Tierra y la superficie del geoide. Esta se mide a lo largo de la denominada línea de plomada o la vertical, curva que es tangencial a la dirección de la gravedad en todo punto.

¹¹ Fuente: <https://www.docsity.com/es/coordenadas-utilizadas-en-geodesia-apuntes-topografia/177698/>

- o La Cota Elipsoidal (h), es la distancia entre la superficie física de la Tierra y la superficie del elipsoide. Esta se mide a lo largo de la normal al elipsoide.

Estas alturas se encuentran relacionadas mediante la siguiente ecuación:

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

Dónde: $H \perp \text{Geoide}$; $h, N \perp \text{Elipsoide}$; $N = \text{Ondulación Geoidal}$

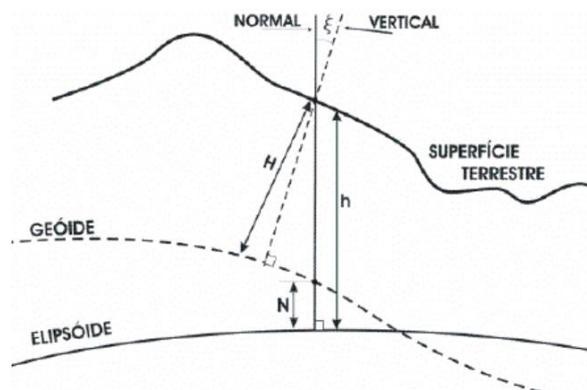


Figura 2.1.4 - Relación entre la altura Ortométrica y Elipsoidal.¹²

La nivelación satelital implica reemplazar las técnicas clásicas de nivelación por mediciones GNSS, obteniendo la ecuación (iii):

$$(iii) \quad \delta H_{AB} = \delta h_{AB} - \delta N_{AB}$$

Mediante el relevamiento GNSS se obtiene δh_{AB} , si adicionalmente se cuenta con un modelo geoidal, se conoce δN_{AB} , siendo posible calcular diferencias de alturas ortométricas (δH_{AB}). Evidenciando la importancia de los modelos geoidales para un adecuado uso de los sistemas GNSS.

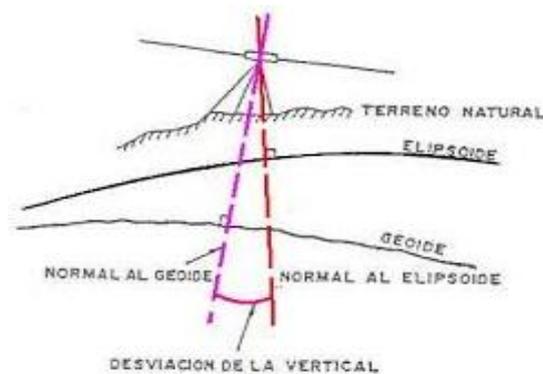


Figura 2.1.5 - Desviación de la vertical.¹³

¹² Fuente: <https://n9.cl/rel-h-ortometrica-elipsoidal>

¹³ Fuente: <https://ocw.unican.es/pluginfile.php/259/course/section/161/tema1.pdf>

Se denomina desviación de la vertical al ángulo establecido entre la normal al elipsoide y la vertical. Este ángulo es en general del orden de algunas décimas de miligrados.¹⁴

Modelo Global EGM-2008

El modelo geoidal gravitacional terrestre EGM2008, publicado por la Agencia Nacional de Inteligencia Geoespacial (NGA) de Estados Unidos, es el más distribuido y utilizado actualmente. Los cálculos del geoide local se basan en la teoría de condensación de Helmert (la topografía se condensa en una capa delgada sobre el geoide). Numéricamente, se traduce en la sustitución de la anomalía de la gravedad por la anomalía de Faye.

2.1.6 Sistema Global de Navegación Satelital: GNSS

La Geodesia espacial se basa en la recepción de señales electromagnéticas emitidas por satélites artificiales, o por cuántares (emisiones de radio muy lejanas en el espacio), como también observaciones a la luna y estrellas.

El término GNSS engloba a los Sistemas de Navegación por Satélite que proporcionan un posicionamiento geoespacial con cobertura global. Por ejemplo: GPS, GLONASS, BeiDou, Galileo y QZSS. Todos se apoyan en los mismos principios básicos, pero con ciertas diferencias en algunos aspectos geométricos y físicos.

Sistema de Posicionamiento Satelital

El sistema GNSS se compone de tres partes:

- El Segmento Espacial está conformado por la estructura de satélites. Cada constelación GNSS (GPS, Glonas, etc.), presenta características diferentes, las cuales son conocidas, permitiendo la compatibilidad de los satélites y facilitando la medición GNSS.
- El Segmento de Control consiste en estaciones terrestres, que monitorean las posiciones de los satélites y transmiten a cada uno de éstos: efemérides actualizadas, estado del satélite, error de reloj y otras correcciones.
- El Segmento de Usuario son los receptores GNSS que calculan la posición del usuario por medio de las señales recibidas.

¹⁴ Fuente: <https://ocw.unican.es/pluginfile.php/259/course/section/161/tema1.pdf>

Efemérides

Se denomina efemérides a los datos necesarios para determinar la posición de los satélites en el espacio. Esta queda determinada por los parámetros de una órbita kepleriana perturbada.

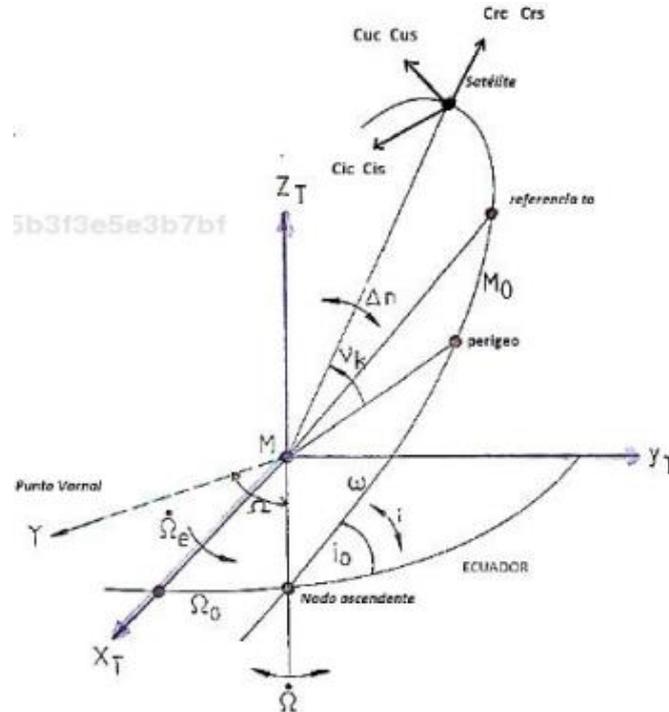


Figura 2.1.6 - Parámetros y perturbaciones de una órbita Kepleriana perturbada. ¹⁵

Las efemérides transmitidas son parámetros orbitales que permiten determinar la posición del satélite en la órbita, suministradas al receptor GNSS en el mensaje de navegación, siendo predicciones de los parámetros reales, en tiempo real, con una validez de dos horas.

Las efemérides precisas son datos (X, Y, Z) de alta precisión de la posición del satélite en la órbita. Se encuentran disponibles luego de un cierto periodo de tiempo, diferenciando tres tipos de efemérides precisas: Ultrarrápida, Rápida y Final.

Principios del Posicionamiento Satelital

El posicionamiento GNSS, está basado en las observaciones a un mínimo de cuatro satélites simultáneamente. Se mide la distancia satélite-receptor mediante el tiempo de propagación de la señal. Adicionalmente se necesita la posición de los satélites, que es transmitida permanentemente a través de las efemérides transmitidas.

¹⁵ Fuente: BERNÉ, José Luis – Anquela Julián, y otros. 2014. “GNSS: GPS: Fundamentos y aplicaciones en Geomática”. Editorial de la Universidad Politécnica de Valencia, España.

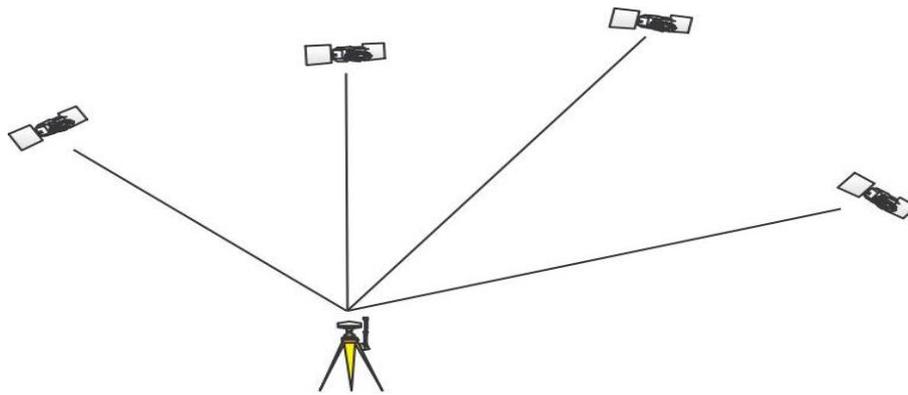


Figura 2.1.7 - Receptor observando 4 satélites simultáneamente.¹⁶

La distancia satélite-receptor es calculada comparando la señal recibida desde el satélite con una réplica generada en el receptor. La diferencia de fase, entre la señal recibida y la generada localmente, es proporcional al tiempo de propagación de la onda. Realizando la intersección de 3 esferas con centro en los respectivos satélites, se puede determinar las coordenadas del punto del receptor (se presentan dos puntos solución, uno es descartado por incoherente).

Mientras los satélites están equipados con relojes atómicos, los receptores generan una señal local usando relojes de cuarzo (de menor precisión), la diferencia de fase absorbe también esta inestabilidad. Por lo tanto, es necesario una 4ª observación para determinar la diferencia de tiempo en los relojes (corrección de los relojes).

2.1.7 Técnicas de Medición GNSS

Existen distintos métodos de observación GNSS, en función del instrumental, de las técnicas de procesamiento de los observables y los requerimientos de precisión deseados.

La clasificación más importante, se da al distinguir entre dos grandes métodos de posicionamiento, absoluto y relativo.

¹⁶ Fuente: <http://detopografia.blogspot.com/2012/12/conceptos-fundamentales-gps-ii.html>

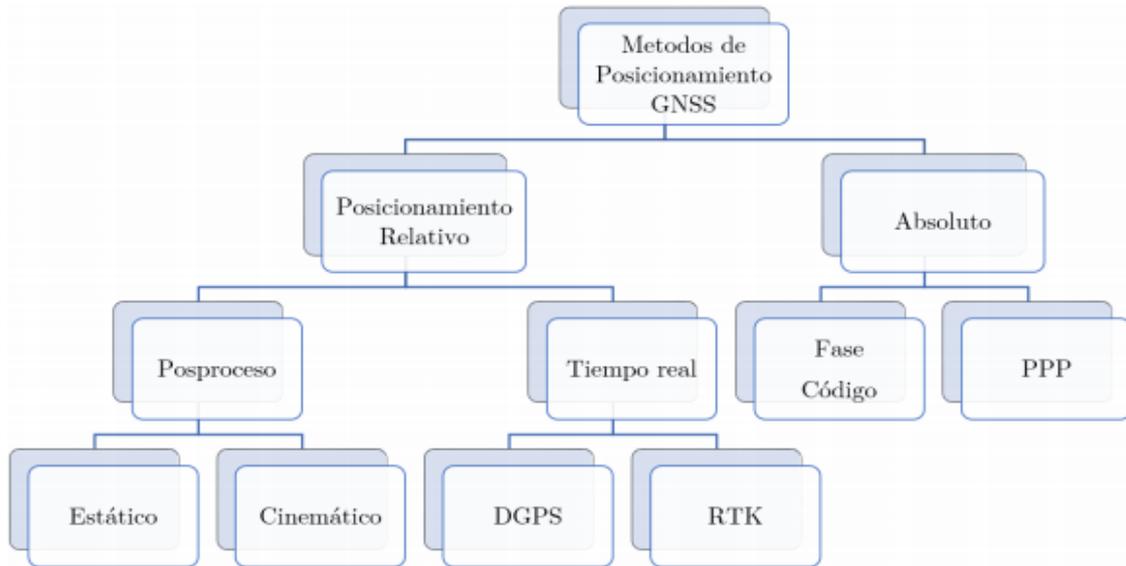


Figura 2.1.8 - Métodos de Observación GNSS.¹⁷

Clasificación de los Métodos de Observación

Se pueden definir cuatro criterios de clasificación de los métodos de observación GNSS:

1. SEGÚN EL NÚMERO DE RECEPTORES

- Absoluto: Se trabaja con un único receptor GNSS y se obtienen las coordenadas en un sistema global.
- Diferencial o Relativo: Se trabaja con un mínimo de 2 receptores GNSS, esta técnica calcula los incrementos de las coordenadas respecto a la coordenada base, eliminando principalmente errores atmosféricos y estado de los relojes.

2. SEGÚN LOS OBSERVABLES

- Código (Pseudodistancia): El satélite y el receptor simultáneamente reproducen una marca en el tiempo y al llegar la señal al receptor son comparadas, determinando el tiempo de propagación de la onda.
- Medida de Fase: Se mide la distancia satélite-receptor a partir del número entero N de longitudes de onda y el residual.

3. SEGÚN EL MOMENTO EN EL QUE SE EFECTÚA EL CÁLCULO

- Postproceso: La obtención de coordenadas se realiza después de la observación.
- Tiempo real: la obtención de coordenadas se realiza en simultáneo a la observación.

¹⁷ Fuente: BERNÉ, José Luis – Anquela Julián, y otros. 2014. “GNSS: GPS: Fundamentos y aplicaciones en Geomática”. Editorial de la Universidad Politécnica de Valencia, España

4. SEGÚN EL MOVIMIENTO DEL RECEPTOR Y LAPSO DE OBSERVACIÓN

- Estático: Se denomina así porque los receptores ocupan las estaciones por un periodo de tiempo prolongado. (ej.: 3hrs. para vectores de 50 km.).
- Estático rápido: Es un posicionamiento similar al estático, pero con periodos de observación y distancias más cortos (ej.: 20 min. para vectores de 5 km).
- Cinemático o Dinámico: Se emplean al menos dos receptores; mientras uno cumple la función de estación fija, el o los otros receptores se desplazan punto a punto.
- Navegación Precisa a tiempo Real (RTK): Consta de dos receptores midiendo simultáneamente en dos posiciones diferentes, una de ellas conocida y calculando las correcciones en tiempo real.

Para este proyecto, se opta por el posicionamiento relativo, el cual presenta una gran cantidad de ventajas para el levantamiento topográfico. Se entiende pertinente el desarrollo de esta metodología y la explicación de las bondades que este presenta en el país, gracias a la densificación de las CORS en el territorio.

Posicionamiento Relativo

Consiste en el procesamiento de diferencias entre observaciones realizadas simultáneamente por al menos dos receptores a los mismos satélites. Se establece un receptor como estación fija, de coordenadas conocidas, y se calculan los incrementos de coordenadas ΔX , ΔY , ΔZ hasta el segundo receptor móvil.

Esta estrategia aprovecha que los errores de las observaciones de los receptores son semejantes, especialmente los atmosféricos y el estado de los relojes, por lo que se eliminan en el procesamiento diferencial, al ocupar vectores pequeños (distancia entre receptores menor a 30 km).

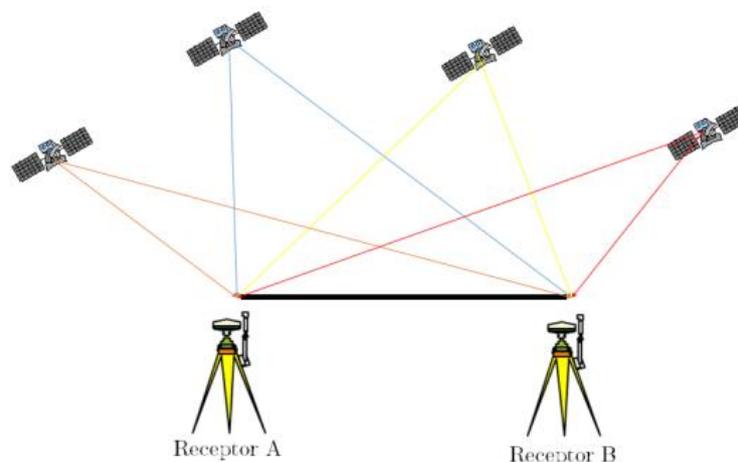


Figura 2.1.9 - Posicionamiento Diferencial.¹⁸

¹⁸ Fuente: Elaboración propia.

Se recomienda colocar la estación fija en una zona alta, llana y con escasa vegetación o edificación cercana para favorecer la recepción de señal y por lo tanto mejorar la medición.

Esta metodología tiene la ventaja de obtener buena precisión en los resultados, sin embargo, la exactitud obtenida está sujeta a las coordenadas de la estación fija. Por lo que es necesario partir de un punto con coordenadas conocidas o bien obtenerla con mayor exactitud.

Posicionamiento GNSS y las CORS

Una práctica habitual entre los Ing. Agrimensores al utilizar el método diferencial, es la utilización de una estación de referencia (CORS) del Instituto Geográfico Militar, debido a que resuelve la limitante respecto a la exactitud de las coordenadas de la estación de referencia.

Sin embargo, se debe ejecutar esta metodología cuando la distancia entre la estación de referencia y la estación móvil no sea significativamente grande, debido a que los errores aumentan con la distancia. Para sincronizar ambos equipos se realiza la conexión entre estos vía Internet, mediante el protocolo Ntrip, de manera que los datos obtenidos por la estación de referencia son enviados a la controladora del equipo móvil.

Cuando la estación de referencia no se encuentra disponible, o la distancia entre ésta y el receptor móvil son grandes, se suele utilizar el posicionamiento relativo con una base auxiliar, realizando la conexión entre ellos mediante ondas de radio.

Si no se cuenta con un punto de coordenadas conocidas y es necesario utilizar un sistema de referencia global, se pueden guardar observaciones por un tiempo prolongado (ver *Figura 2.1.10*), mediante levantamiento Estático. Luego se post-procesa con las observaciones de una CORS, proporcionando una mejor solución para las coordenadas de la base auxiliar.

Longitud de línea base	Tiempo observación	Precisión horizontal
≤ 20 km	1 hora	3 mm + 1 ppm
20 - 50 km	2 horas	3 mm + 1 ppm
50 - 100 km	Mínimo 2 horas	3mm + 1 ppm
> 100 km	Mínimo 3 horas	3 m + 1ppm

*Figura 2.1.10 - Relación Línea Base y Tiempo de Obs. en Posicionamiento Relativo-Estático.*¹⁹

¹⁹ Fuente: BERNÉ, José Luis – Anquela Julián, y otros. 2014. “GNSS: GPS: Fundamentos y aplicaciones en Geomática”. Editorial de la Universidad Politécnica de Valencia, España

2.1.8 Solución de Red

La solución de red se utiliza para modelar y corregir errores sistemáticos, (ionosféricos, troposféricos, etc.). Este tipo de solución posicional, presenta similares precisiones que, en el método diferencial convencional, con la bondad de cubrir una mayor área de cobertura. Además, proporciona una mayor seguridad de las soluciones e integridad al servicio.

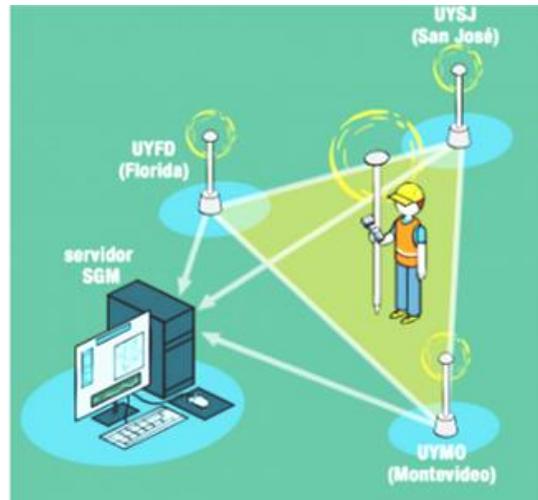


Figura 2.1.11 - Solución de Red.²⁰

Existen distintos métodos de solución de red, los primeros productos fueron la Estación de Referencia Virtual (VRS) y los Parámetros de Correlación por planos (FKP). Posteriormente, aparecieron otras soluciones, como por ejemplo Master- Auxiliary Concept (MAC) en sus 2 variables, Master Auxiliary Corrections (MAX) e Individual Master-Auxiliary Corrections (i-MAX).

Los distintos datos de las estaciones de referencia que definen la celda, se agrupan dependiendo del tipo de solución de red, y con estos se calcula una solución común para los puntos pertenecientes al interior de la celda, la cual es enviada al usuario.

En este trabajo se emplea la tecnología de Estación de Referencia Virtual (VRS), servicio proporcionado por el Instituto Geográfico Militar, por lo tanto, se desarrolla a continuación.

Estación de Referencia Virtual (VRS)

La tecnología VRS está basada en una red de estaciones de referencia GNSS conectadas a un centro de control que continuamente recoge la información y crea una base de datos de las correcciones de la región que abarca la red. Estas correcciones son utilizadas para crear una estación de referencia virtual situada próxima a la ubicación del receptor del usuario.

²⁰ Fuente: <https://igm.gub.uy/geoportal/informacion-gral-estaciones>

Los datos del usuario y de la estación virtual son procesados en modo de base-línea simple para determinar las coordenadas del receptor móvil. Sin embargo, para el caso en que el receptor móvil recorra grandes distancias, serán necesarias actualizaciones de la posición de la estación virtual y sus respectivos datos generados. Idealmente, estas actualizaciones no son necesarias para distancias menores a 10 km.

Estaciones de Referencia Virtual del IGM

El Usuario de la REGNA-ROU envía su posición aprox. con su receptor móvil al Servidor del IGM. Esta operación se realiza utilizando un tipo de comunicación bidireccional vía Internet. El Servidor del IGM recibe la posición y responde con las correcciones RTCM al receptor móvil. Tan pronto como se reciben, el receptor móvil calcula una posición DGPS de calidad que sirve para actualizar su posición y enviarla nuevamente al Servidor del IGM.

Con esta técnica de creación de Estación de Referencia Virtual, es posible alcanzar una precisión horizontal de hasta 1-2 cm, en cualquier punto interior de la red y en un entorno aproximado de 10-15 Km., cuando las distancias entre las estaciones de referencia son de 50-70 km.

2.1.9 Errores en el Posicionamiento GNSS

La exactitud del posicionamiento GNSS depende de dos factores ($\sigma = \mathbf{DOP} \times \mathbf{UERE}$):

- La exactitud en la medición de pseudodistancia, expresada por el error de distancia equivalente de usuario (UERE).
- La configuración espacial de los satélites usados (DOP).

Error de Distancia Equivalente de Usuario (UERE)

Al examinar los errores que afectan a las mediciones de distancia receptor-satélite, podemos expresar la ecuación de observación de pseudodistancia y las perturbaciones que sufre la señal en su recorrido como:

$$(iv) \quad R = \rho + c\Delta\delta + I_R^S + T_R^S + d_{MR}^S + \varepsilon_R^S$$

R - Pseudodistancia medida	I_R^S - Retardo de la distancia por la Ionosfera
ρ - Distancia satélite-receptor	T_R^S - Retardo de la distancia por la Troposfera
$\Delta\delta$ - Error de los relojes	d_{MR}^S - Retardo por el multicamino de la señal
ε_R^S - Error intrínseco a la medición	

El efecto combinado de todas las fuentes de error proyectado en la línea satélite-receptor se llama error de distancia equivalente de usuario (UERE). Algunos receptores, sobre todo los RTK, indican en pantalla el UERE de cada satélite, informando sobre la exactitud de la observación actual.

Podemos afirmar entonces que las mediciones se encuentran afectadas por errores sistemáticos y aleatorios, asociados al satélite, al medio de propagación y al receptor.

ERRORES ASOCIADOS AL SATÉLITE

- Error de Efeméride: Las órbitas transmitidas de los satélites son una extrapolación temporal y ésta es la principal causa del error de efemérides.
- Error de los Relojes: Los satélites GNSS están equipados con relojes atómicos, pero el tiempo medido por estos no es coincidente con el tiempo del sistema GNSS, por lo cual es necesario un continuo ajuste de los mismos.

ERRORES ASOCIADOS AL MEDIO DE PROPAGACIÓN

Cuando una señal atraviesa la atmósfera terrestre, se modifica tanto la velocidad como la dirección de propagación de las ondas electromagnéticas (refracción atmosférica).

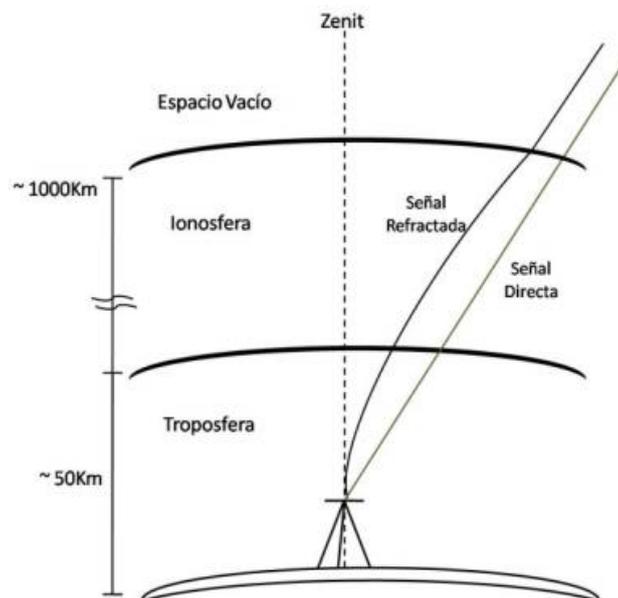


Figura 2.1.12 - Comportamiento de la onda electromagnética en la atmósfera. ²¹

- Error Ionosférico: La Ionosfera es la región de la atmósfera donde se encuentra una gran cantidad de electrones libres, debido a esto, la distancia medida no coincide exactamente con la distancia geométrica satélite-receptor y debe ser corregida.

²¹ Fuente: https://sirgas.ipgh.org/docs/Boletines/Bol15/23a_Cioce_et_al_vapor_de_agua.pdf

- Error Troposférico: La troposfera es la región de la atmósfera que presenta mayor cantidad de átomos neutros y moléculas de vapor de agua que afectan la propagación de la onda electromagnética.

ERRORES ASOCIADOS AL RECEPTOR

- Error de Medición: Es el error intrínseco de cualquier medición electromagnética y depende de la calidad del receptor.
- Error de Multicamino: Este error se produce cuando la antena del receptor recibe simultáneamente la señal del satélite y un reflejo de la misma desde algún objeto cercano.

Factor de Dilución de la Precisión (DOP)

El DOP se relaciona con la geometría de los satélites visibles durante un posicionamiento, este valor depende de la distancia entre los satélites y su posición en el cielo. Básicamente, cuantas más señales pueda observar un receptor GNSS, más precisas pueden ser sus soluciones, siempre y cuando, los satélites se encuentren bien distribuidos y separados entre sí.

Se pueden calcular distintos tipos de DOP:

- VDOP - Dilución Vertical de la Precisión (interviene la altura h).
- HDOP - Dilución Horizontal de la Precisión (interviene la latitud y longitud).
- PDOP - Dilución de la Precisión en Posicionamiento (interviene x,y,z).
- GDOP - Dilución de la Precisión Geométrica (interviene x,y,z y el tiempo).

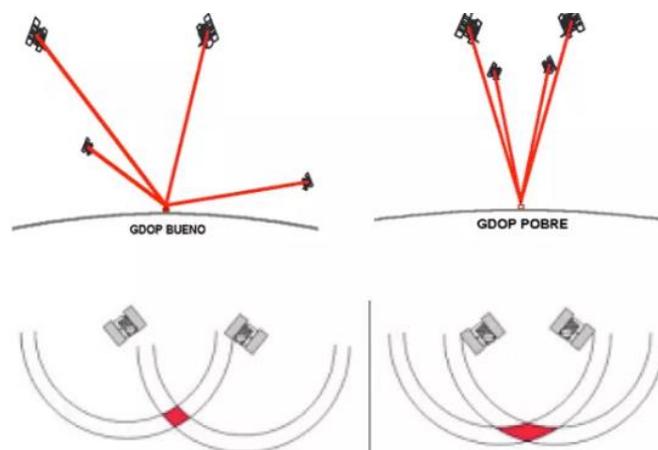


Figura 2.1.13 - Comportamiento del error asociado a la disposición geométrica de los satélites.²²

²² Fuente: <https://www.abisme.net/single-post/13-errores-del-gps-parte-1>

2.2 Cartografía

Mientras la Geodesia estudia la forma de la Tierra, la Cartografía permite definir las transformaciones necesarias para representar esta superficie tridimensional como una superficie plana con un sistema de alturas independiente. Siendo que se utilizan distintos paquetes de datos en este trabajo, es necesario conocer sus sistemas de proyección y fundamentos, entre otros conceptos.

2.2.1 Introducción a la Cartografía

Según Martin Asin (1990) *“la Cartografía es la ciencia que estudia la representación plana de la esfera o el elipsoide, tratando de obtener por el cálculo las coordenadas de los puntos del plano correspondientes a los situados en dichas superficies.”*

El problema en la representación de estos puntos, es que la Tierra no puede ser representada por una superficie plana sin sufrir deformaciones. Por lo tanto, es trabajo de la Cartografía la determinación de la óptima representación de la Tierra, que conserve la mayor cantidad de propiedades métricas.

La proyección cartográfica puede entonces condicionarse para conservar algunas características geométricas como distancias, ángulos o áreas, pero solo una de ellas a la vez.

2.2.2 Proyección Cartográfica

Las proyecciones cartográficas, se realizan a través de una correspondencia biunívoca entre superficies, lo que significa que a cada punto sobre el elipsoide (superficie terrestre) le corresponde un punto sobre el plano.

Siendo A un punto cualquiera sobre el elipsoide, de coord. geodésicas (φ, λ) y A' su correspondiente en el plano, de coord. cartesianas (x, y) , se relacionan a través de las funciones (f, g) .

$$(i) \quad A(\varphi, \lambda), A'(x, y) \rightarrow \begin{cases} x = f(\varphi, \lambda) \\ y = g(\varphi, \lambda) \end{cases}$$

Clasificaciones de las Proyecciones Cartográficas

Existen distintas proyecciones cartográficas con características diferentes, creadas y utilizadas para fines concretos. Además, existen diversos criterios para clasificarlas, enumeradas a continuación:

1. SEGÚN LA CARACTERÍSTICA GEOMÉTRICA QUE SE CONSERVA

- Equidistante: Conserva las distancias.
- Conforme: Conserva los ángulos.
- Equivalente: Conserva las áreas.
- Afiláctica: No conserva ninguna de las propiedades.

2. SEGÚN LA INTERSECCIÓN DE LAS SUPERFICIES DE PROYECCIÓN Y OBJETIVO.

- Externa: La superficie de proyección no se intersecta con la superficie objetivo.
- Interna: Las superficies se intersectan en una posición interna.
- Secante: Las superficies se intersectan en un único punto o línea de tangencia.

3. SEGÚN LA SUPERFICIE DE PROYECCIÓN

- Plana.
- Cilíndrica.
- Cónica.
- Poliédrlica.

4. SEGÚN LA POSICIÓN DE LA SUPERFICIE DE PROYECCIÓN RESPECTO A LA OBJETIVO

- Normal (Directa): Eje de la superficie de proyección normal al plano del ecuador.
- Ecuatorial (Transversa): Eje de la superficie de proyección paralelo al plano del ecuador.
- Azimutal (Oblicua): Eje de la superficie de proyección intermedio entre la normal y paralelo al plano del ecuador.

2.2.3 Proyección Universal Transversal Mercator (UTM)

Es una proyección Transversa de Mercator Universal, que utiliza un cilindro como superficie intermedia entre el elipsoide y el plano. Es una proyección conforme, y por su carácter de transversa, el cilindro se ubica de forma tal que su eje de revolución es perpendicular al eje de la Tierra.

Para representar los resultados de esta proyección, la Tierra se divide en 60 husos (de 6° de longitud) y 20 bandas (de 8° de latitud) entre los paralelos 80°S y 84°N, las que se denominan desde la C a la X, excluyendo I, O y Ñ. Uruguay se encuentra en los husos 21 y 22, y en las bandas H y J.

Para la representación de los polos se utiliza el sistema de coordenadas UPS, que significa Polar Estereográfico Universal.

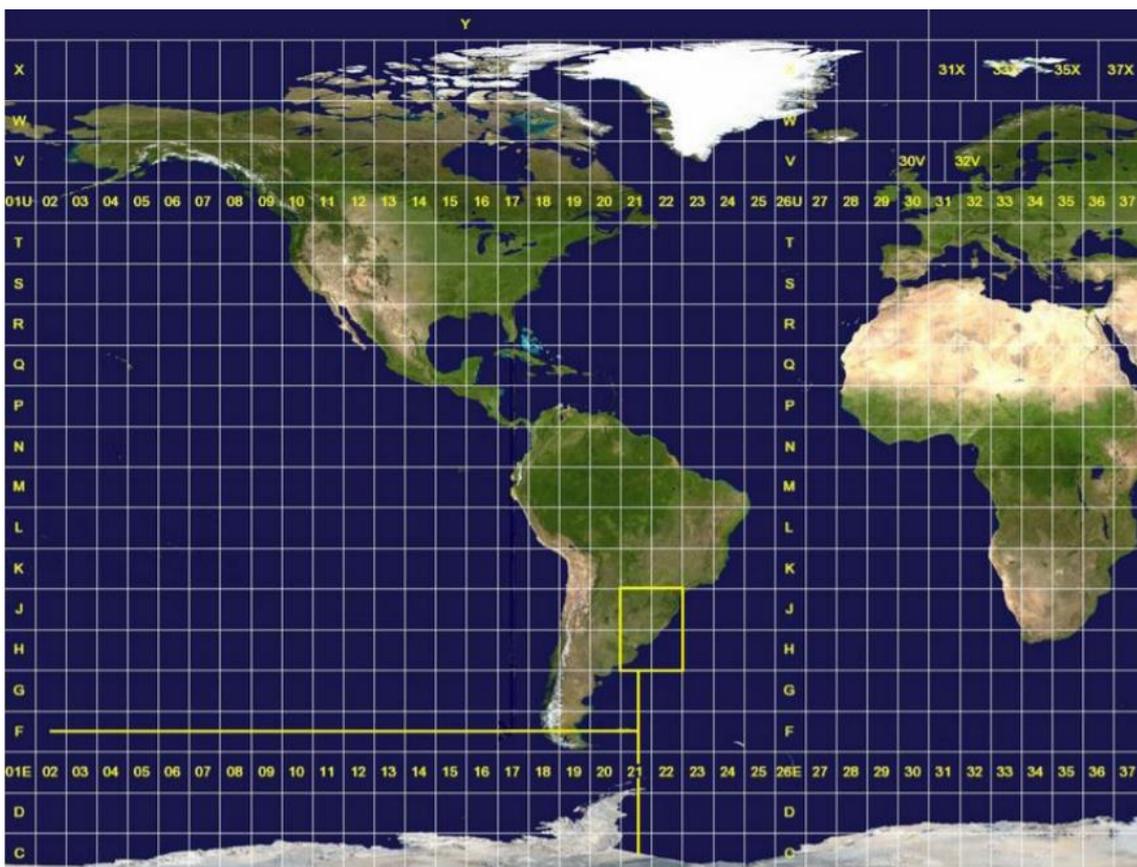


Figura 2.2.1 - Representación de la proyección UTM - Representación de la proyección UTM.²³

²³ Fuente: <https://n9.cl/wikipedia-transversalmercator>

Deformaciones de la proyección

1. CONVERGENCIA PLANA DE LOS MERIDIANOS

Es el ángulo que forma la paralela al meridiano de contacto con la tangente a la transformada del meridiano en el punto considerado. Puede observarse también como el ángulo entre la tangente a la transformada del paralelo que pasa por el punto en cuestión y la perpendicular al meridiano de contacto.

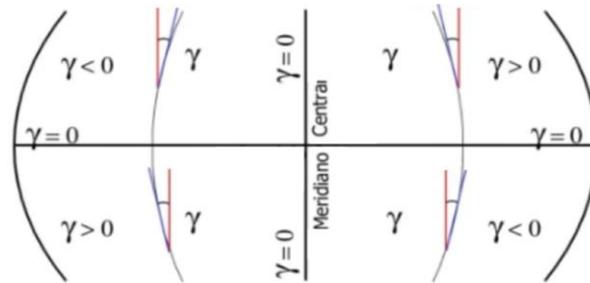


Figura 2.2.2-Convergencia plana de meridianos UTM.²⁴

La fórmula para calcular la convergencia es la siguiente:

$$(ii) \quad \gamma = \Delta\lambda \cdot \text{sen}(\varphi) + \frac{\Delta\lambda^3}{3} \cdot \text{sen}(\varphi) \cdot \text{cos}^2(\varphi) \cdot (1 + 3n^2 + 2n^4), \quad n^2 = \frac{e^2}{1-e^2} \cdot \text{cos}^2(\varphi)$$

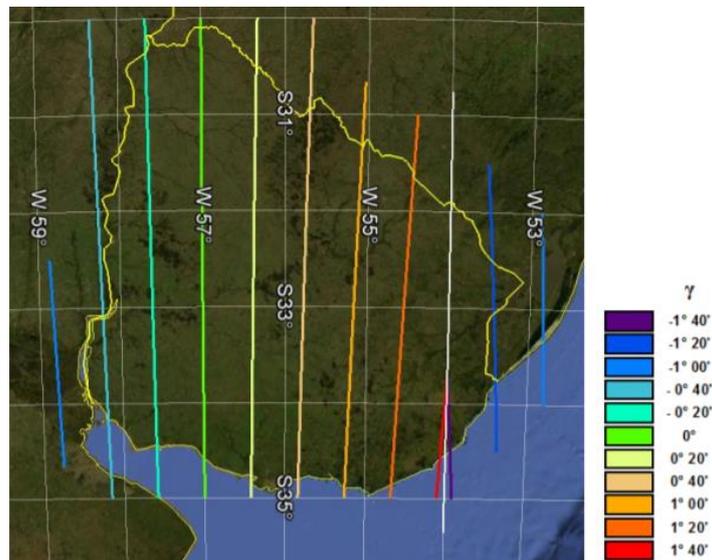


Figura 2.2.3 - Isoconvergencia γ de los meridianos para la proy. UTM en Uruguay.²⁵

Observando el mapa de isoconvergencia (Figura 2.2.3) se puede afirmar que las deformaciones no varían linealmente y los valores que esta toma son susceptibles a la variación de latitud.

²⁴ Fuente: *Elaboración propia*.

²⁵ Fuente: LOPEZ, Rocío y Esteban Striewe. 2011. Proyecto de grado. FING. Uruguay.

2. COEFICIENTE DE DEFORMACIÓN LINEAL

Se define como la relación entre la longitud de un elemento de geodésica en el plano, y su longitud en el elipsoide.

La fórmula para calcular el coeficiente k es la siguiente:

$$(iii) \quad k = 0.9996 \cdot \left[1 + \frac{\Delta\lambda^2}{2} \cdot \cos^2(\varphi) \cdot (1 + n^2) \right], \quad n^2 = \frac{e^2}{1-e^2} \cdot \cos^2(\varphi)$$

Se observa que k puede tomar valores mayores o menores que 1. Por lo tanto, las distancias medidas sobre el plano de la proyección pueden ser mayores o menores que las medidas sobre la superficie sin proyectar.

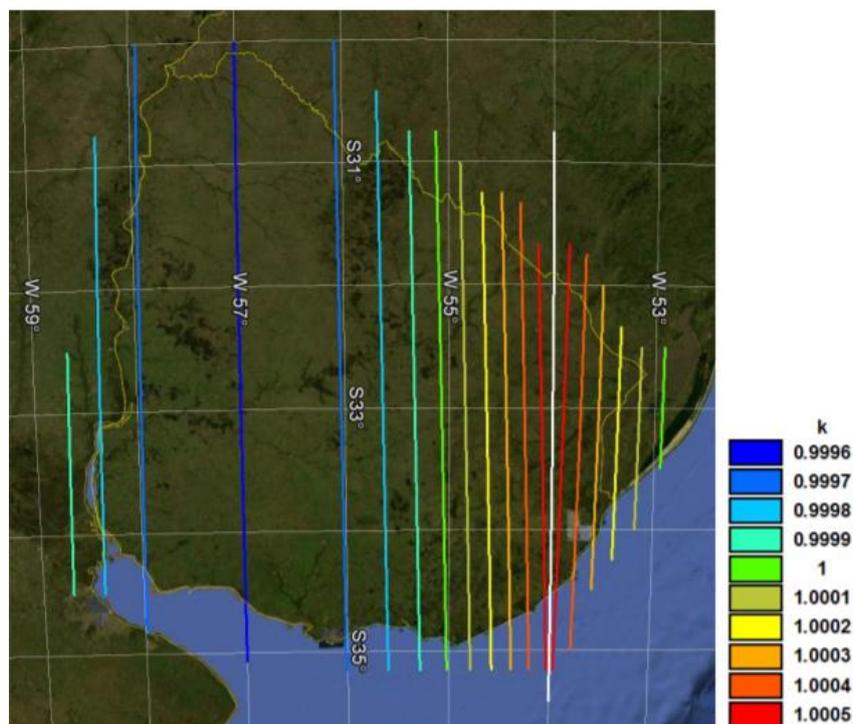


Figura 2.2.4 - Isodeformación lineal k de los meridianos para la proy. UTM en Uruguay.²⁶

Al igual que con el mapa de isoconvergencia, se puede afirmar que las deformaciones lineales tampoco varían linealmente, aunque los valores de esta, a diferencia de la convergencia de meridianos, son menos susceptibles a la variación de latitud.

²⁶ Fuente: LOPEZ, Rocío y Esteban Striewe. 2011. Proyecto de grado. FING. Uruguay.

3. COEFICIENTE DE DEFORMACIÓN SUPERFICIAL

Para solucionar el problema de las deformaciones superficiales en esta proyección se aplica el coeficiente de deformación lineal elevado al cuadrado.

Por lo que la fórmula para el cálculo del coeficiente k_s resulta:

$$(iv) \quad k_s = k^2 \Rightarrow k_s = \left[0.9996 \cdot \left[1 + \frac{\Delta\lambda^2}{2} \cdot \cos^2(\varphi) \cdot (1 + n^2) \right] \right]^2, \quad n^2 = \frac{e^2}{1-e^2} \cdot \cos^2(\varphi)$$

2.3 Fotogrametría

Al analizar en este proyecto ortoimágenes y MDTs generados por un vuelo fotogramétrico, se considera oportuno aportar algunos conceptos básicos sobre estos temas.

2.3.1 Introducción a la Fotogrametría

Es la ciencia encargada de realizar mediciones e interpretaciones por medio de fotografías aéreas y satelitales, obtener características métricas y geométricas del objeto fotografiado.

Fotografía aérea y plan de vuelo

Se puede definir como una imagen tomada desde una nave acondicionada para este fin, con cámaras especializadas para la toma de grandes extensiones de superficie.

Para que el producto resulte útil, es necesario establecer especificaciones y preparar instrucciones detalladas acerca de la obtención de las imágenes, recorridos fotográficos, etc., constituyendo correctamente un plan de vuelo.

Parámetros a considerar:

- Especificaciones técnicas: Incluye la zona a volar; escala promedio de la fotografía; cámara empleada; recubrimiento lateral; recubrimiento longitudinal.
- Factores a considerar: Uso de la fotografía; finalidad del producto (mapa, plano, mosaico); especificaciones de exactitud; forma y tamaño del área; tipo de relieve.
- Otros parámetros como: Abarcamiento total de cada fotograma en terreno; distancia entre líneas de vuelo; avance entre fotos; cantidad de líneas de vuelo; cantidad de kilómetros lineales; cantidad de fotos; altura de vuelo; altitud promedio del terreno.

Deformación de la fotografía aérea

Todo mapa o plano de precisión puede considerarse como una proyección ortogonal, donde todos los elementos se representan con una posición horizontal correcta, obteniendo una vista vertical verdadera de la superficie. Por otro lado, la fotografía aérea, posee una proyección central (los rayos que forman la imagen pasan por un mismo punto), por lo tanto, al proyectar la superficie tridimensional de la tierra en una foto de dos dimensiones se obtiene una imagen deformada.



Figura 2.3.1 - Deformaciones geométricas.²⁷

Se clasifican las principales deformaciones en 3 grupos:

1. DESPLAZAMIENTO POR RELIEVE

El relieve de la superficie de la tierra, provoca el desplazamiento de los objetos respecto a su posición verdadera. Conociendo este desplazamiento, se puede calcular la diferencia de altura entre dos puntos que estén sobre la misma vertical. Es el principio para la creación de los modelos digitales de terreno (MDT), permite ver en estereoscopia y se elimina al crear la ortoimagen.

2. DESPLAZAMIENTO POR INCLINACIÓN

El movimiento del avión provoca que los fotogramas no sean perfectamente verticales, produciendo distorsión en las imágenes. Se corrige con la Orientación Relativa, procedimiento que ubica las imágenes en su posición correcta.

3. ERRORES DE LAS LENTES

Las lentes de las cámaras presentan imperfecciones, que provocan una reducción en la calidad de la imagen. Este desplazamiento es enmendado en un tratamiento denominado Orientación Interior.

2.3.2 Ortoimagen

Es una fotografía con propiedades geométricas de un mapa, que permite la localización precisa de los elementos sobre el terreno. Se construye mediante el proceso de ortorectificación, que transforma

²⁷ Fuente: BARRIENTOS, María, Luis Velozo, y otros. 2004. "PRINCIPIOS Y MÉTODOS DE LA FOTOINTERPRETACIÓN" Santiago de Chile.

la proyección de perspectiva central en ortogonal, corrigiendo las deformaciones provocadas por la inclinación y el relieve. Se requieren imágenes con perspectiva conocida, y un modelo de elevaciones.

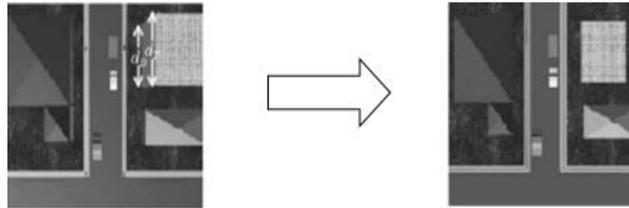


Figura 2.3.2 - Proceso de ortorectificación.²⁸

Control de la Ortoimagen

Se pueden realizar tres tipos de evaluaciones:

- Calidad Radiométrica: Se analiza a través de los histogramas, busca que las ortoimágenes tengan una calidad radiométrica similar entre ellas.
- Calidad Geométrica: Se analiza a través de puntos de control, se puede usar cualquier método para control posicional por puntos.
- Calidad Visual: Se buscan rayones o manchas, arrastres o deformaciones, zonas saturadas o puntos calientes, empalmes internos y externos, etc.

2.3.3 Modelo digital del terreno (MDT)

Es una estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de una variable asociada a fenómenos geográficos. Constituye una representación simplificada de la realidad, lo que produce un error inherente al proceso de modelización.

Modelo digital de Elevaciones (MDE)

Es un MDT que representa la distribución espacial de la altitud de la superficie del terreno, describe una función bi-variable continua: $Z = z(x, y)$.

Se pueden organizar en estructuras que representan las relaciones espaciales y topológicas:

- | | |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none">○ Mapa impreso:<ul style="list-style-type: none">● Curvas de nivel.● Puntos acotados. | <ul style="list-style-type: none">○ MDE:<ul style="list-style-type: none">● Vectorial.● Ráster. |
|--|--|

²⁸ Fuente: PEREZ Álvarez y Juan Antonio. 2001. “Apuntes de Fotogrametría III”. Universidad de Extremadura, Centro Universitario de Mérida.

Control del MDE

Se pueden utilizar metodologías de control posicional por puntos (MCP), usando puntos relevados con mayor exactitud. Como el MDE está compuesto por puntos no fotoidenticables, se busca que los puntos relevados pertenezcan a un mismo plano o de pendiente poco pronunciada, a efectos de que el error planimétrico no afecte demasiado al error vertical.

2.4 Teoría de Errores y Estadística

La Teoría de Errores utiliza conceptos estadísticos para sus procesos de resolución, por ende, se presenta información necesaria para el entendimiento de los procedimientos matemáticos a utilizar en este proyecto.

2.4.1 Introducción a la Teoría de Errores

Toda medición de una magnitud física que se realice presenta errores, independientemente de la forma que se haga o del instrumento que se utilice, no se puede obtener un simple número exacto. Por lo que se considera, a la medida, como un intervalo de incertidumbre, dentro del cual se tiene confianza de que se encuentra el verdadero valor de la magnitud medida.

Clasificación de los errores de observación

1. EQUIVOCACIONES

Son variaciones causadas por el observador, durante el proceso de medición que se apartan de la variación natural y no pueden ser toleradas. La observación debe ser descartada y medirse nuevamente.

2. SISTEMÁTICOS

Obedecen a una ley determinada, y se pueden representar matemáticamente. Si se conocen las condiciones o se pueden medir, es posible calcular una corrección a los observados.

3. ALEATORIOS

Son ocasionados por factores que quedan fuera del control del observador y poseen un comportamiento aleatorio. Sus magnitudes y frecuencia con que ocurren, siguen las leyes de la probabilidad, y por su naturaleza, no existen métodos para eliminarlos absolutamente. Sin embargo, tienden a cancelarse parcialmente entre sí, en una serie de mediciones.

2.4.2 Introducción a la Estadística

Es la rama de la ciencia, que establece métodos para la extracción de la información a partir de datos observados para comprender mejor las situaciones que estos representan.

Métodos numéricos

1. MEDIDAS DE POSICIÓN

- La **media** aritmética de un conjunto de n datos (X_1, X_2, \dots, X_n) es:

Media Aritmética

$$(i) \quad \bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n}$$

Media Aritmética Ponderada

$$(ii) \quad \bar{X} = \frac{1}{n} \frac{\sum_{i=1}^n X_i \cdot w_i}{\sum_{i=1}^n w_i}$$

- La **mediana** de un conjunto de n datos (X_1, X_2, \dots, X_n) es el valor de la variable para un porcentaje acumulado del 50%. Si los datos están ordenados en función de la magnitud, es el valor del medio si n es impar, y es la media de los dos valores del medio si n es par.
- La **moda** es el valor con mayor frecuencia en un conjunto de datos, puede no existir, y si existe, puede no ser única.

2. MEDIDAS DE DISPERSIÓN

- El **rango** se define como el valor más grande menos el valor más pequeño.

$$\text{Rango} = \text{Máximo} - \text{Mínimo}$$

- La **varianza** muestral (σ^2) proporciona la variabilidad de los datos en relación a la media. A menudo se utiliza la **cuasivarianza** (S^2), como estimación de la varianza muestral. Esta medida tiene la bondad de no presentar sesgos, por lo que es recomendada cuando se utiliza sólo una muestra representativa de la población y no su totalidad.

$$(iii) \quad \sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n}$$

- El **desvío estándar** muestral, indica cuánto se alejan las observaciones de la media.

$$s = \sqrt{S^2} \quad \sigma = \sqrt{\sigma^2}$$

- El **error cuadrático medio** cuantifica la discrepancia que hay entre dos conjuntos de datos.

$$(iv) \quad RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)^2}{n}}$$

3. MEDIDAS DE CENTRADO

- El **coeficiente de sesgo**, proporciona información sobre la simetría de la distribución de la variable observada.

$$(v) \quad CS = \frac{1}{n} \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^3}{s^3} \rightarrow \begin{array}{l} CS = 1 \text{ distribución Normal} \\ CS > 0 \text{ asimetría positiva} \\ CS < 0 \text{ asimetría negativa} \end{array}$$

- El **coeficiente de variación**, interpreta la longitud de las colas en la distribución de valores.

$$(vi) \quad CV = \frac{S}{\bar{X}} \quad \text{Si } CV > 1 \text{ es probable que haya algún valor atípico.}$$

Estadística bivariada

Estudia la relación entre pares de variables observadas simultáneamente en la misma muestra y comprende un conjunto de herramientas que determina las relaciones empíricas entre ellas.

- El **Diagrama de dispersión** sirve para detectar indicadores visuales de la relación existente, al graficar las variables como puntos de coord. (x,y). Por ejemplo, el tipo de correlación:



Figura 2.4.1 - Diferentes distribución de diagramas de dispersión.²⁹

- El **Coefficiente de correlación de Pearson** se emplea para evaluar la correlación lineal entre dos variables. Dado un conjunto de n datos $(X_1, Y_1), (X_2, Y_2), \dots, (X_n, Y_n)$:

$$(vii) \quad \rho_{XY} = \frac{1}{n} \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{S_X S_Y} \quad , \text{ este valor oscila entre } 1 \text{ y } -1.$$

- La **Covarianza** indica el grado de variación conjunta de dos variables respecto a sus medias.

$$(viii) \quad C_{XY} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})$$

²⁹ Fuente: <http://guillermoneria-controlestadistico.weebly.com/165-diagrama-de-dispersioacuten>

2.4.3 Estadística inferencial

Se dedica a la generación de modelos y predicciones, teniendo en cuenta la aleatoriedad de las observaciones. A partir de una muestra de observaciones, se infiere sobre la población a través de los estadísticos, permitiendo conocer el comportamiento de la totalidad del universo de estudio.

Distribución Normal

Es una de las distribuciones más importantes en la estadística que logra modelar varios tipos de fenómenos. Existen diversos tipos de análisis estadísticos que, para ser aplicados, presentan como condición que la serie de datos sea de este tipo.

La Distribución Normal $N(\mu, \sigma)$ se puede definir a partir de la función de densidad:

$$(ix) \quad f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad , \text{ donde: } \mu = \text{media muestral}, \sigma = \text{desviación muestral}$$

Las características de la función densidad están determinadas por los valores que tomen μ y σ , los cuales dependen de la serie de observaciones que se utilicen como muestra.

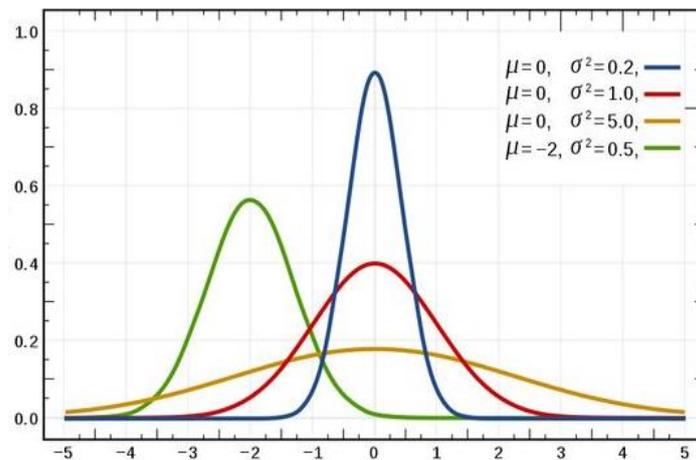
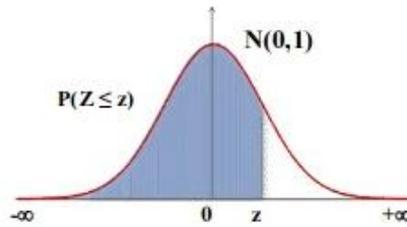


Figura 2.4.2 - Distribución Normal con diferentes valores de μ y σ .³⁰

Debido a que la función densidad no es fácil de manipular, los valores se encuentran tabulados en relación a la distribución Normal $N(0,1)$. Esto permite calcular con rapidez las probabilidades relativas de una distribución Normal, cualquiera sea el valor de μ y σ . Para ello, es necesario tipificar la variable, es decir, centralizar la Normal mediante un cambio de variables.

$$N(\mu, \sigma) ; Z\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right) \quad \rightarrow \quad N(0,1)$$

³⁰ Fuente: <https://n9.cl/ilg5i>



z	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0,0	0,5000	0,5040	0,5080	0,5120	0,5160	0,5199	0,5239	0,5279	0,5319	0,5359
0,1	0,5398	0,5438	0,5478	0,5517	0,5557	0,5596	0,5636	0,5675	0,5714	0,5753
0,2	0,5793	0,5832	0,5871	0,5910	0,5948	0,5987	0,6026	0,6064	0,6103	0,6141
0,3	0,6179	0,6217	0,6255	0,6293	0,6331	0,6368	0,6406	0,6443	0,6480	0,6517
0,4	0,6554	0,6591	0,6628	0,6664	0,6700	0,6736	0,6772	0,6808	0,6844	0,6879
0,5	0,6915	0,6950	0,6985	0,7019	0,7054	0,7088	0,7123	0,7157	0,7190	0,7224
0,6	0,7257	0,7291	0,7324	0,7357	0,7389	0,7422	0,7454	0,7486	0,7517	0,7549
0,7	0,7580	0,7611	0,7642	0,7673	0,7704	0,7734	0,7764	0,7794	0,7823	0,7852
0,8	0,7881	0,7910	0,7939	0,7967	0,7995	0,8023	0,8051	0,8078	0,8106	0,8133
0,9	0,8159	0,8186	0,8212	0,8238	0,8264	0,8289	0,8315	0,8340	0,8365	0,8389
1,0	0,8413	0,8438	0,8461	0,8485	0,8508	0,8531	0,8554	0,8577	0,8599	0,8621
1,1	0,8643	0,8665	0,8686	0,8708	0,8729	0,8749	0,8770	0,8790	0,8810	0,8830
1,2	0,8849	0,8869	0,8888	0,8907	0,8925	0,8944	0,8962	0,8980	0,8997	0,9015
1,3	0,9032	0,9049	0,9066	0,9082	0,9099	0,9115	0,9131	0,9147	0,9162	0,9177
1,4	0,9192	0,9207	0,9222	0,9236	0,9251	0,9265	0,9279	0,9292	0,9306	0,9319
1,5	0,9332	0,9345	0,9357	0,9370	0,9382	0,9394	0,9406	0,9418	0,9429	0,9441

Figura 2.4.3 - Fracción de tabla tabulada de la distribución Normal(0,1).³¹

Ejemplo: El peso de una determinada especie de animal se comporta como una Normal de $\mu = 15.2 \text{ kg}$ y $\sigma = 5.7 \text{ kg}$.

¿Cuál es la probabilidad de que un individuo de esta especie tenga un peso mayor a 20.0 kg ?

$$Z\left(\frac{X-\mu}{\sigma}\right) = \frac{20.0-15.2}{5.7} = 0.84 \quad \rightarrow \quad p(x > 20.0) = 1 - p(x \leq 20) = 1 - 0.7995$$

$$p(x > 20.0) = 0.20 *$$

* La probabilidad de que un individuo de esta especie tenga un peso mayor a 20.0 kg es del 20%.

Intervalos de confianza

Define un par de números entre los cuales se estima que está el verdadero valor, con un determinado nivel de confianza. Para ello se pueden utilizar dos distribuciones:

- Si las muestras son pequeñas, menores a 30 observaciones, se recomienda la distribución T-student (similar a la Normal; si $n \rightarrow \infty$, $T\text{-student} \rightarrow \text{Normal}$).
- Cuando las observaciones son mayores a 30, se utilizan directamente los valores tabulados de la distribución Normal.

³¹ Fuente: <https://ematecs.com/tabla-de-probabilidades-de-la-distribucion-normal/>

1. INTERVALO DE CONFIANZA DE LAS OBSERVACIONES.

Sea v_1, v_2, \dots, v_n una muestra aleatoria que se distribuye como $V \rightarrow N(\mu, \sigma)$, utilizando los valores $\mu = \bar{V}$ y $\sigma = s$ y tipificando con la variable $Z = \frac{v - \bar{V}}{s}$ se obtiene:

$$(x) \quad I\alpha(v) = \left[\bar{V} - sZ_{\alpha/2}, \bar{V} + sZ_{\alpha/2} \right] \quad , \text{ con } (1 - \alpha) \text{ nivel de confianza.}$$

2. INTERVALO DE CONFIANZA DE LA MEDIA.

3. Sea v_1, v_2, \dots, v_n una muestra aleatoria que se distribuye como $V \rightarrow N(\mu, \sigma)$, utilizando los valores $\mu = \bar{V}$ y $\sigma = s/\sqrt{n}$ y tipificando con la variable $Z = \frac{v - \bar{V}}{s/\sqrt{n}}$ se obtiene:

$$(xi) \quad I\alpha(v) = \left[\bar{V} - \frac{s}{\sqrt{n}} Z_{\alpha/2}, \bar{V} + \frac{s}{\sqrt{n}} Z_{\alpha/2} \right] \quad , \text{ con } (1 - \alpha) \text{ nivel de confianza.}$$

2.4.4 Tratamiento de una muestra de observaciones

Partiendo de una muestra de n observaciones de una misma magnitud, medidas en forma independiente y bajo las mismas condiciones, que se comporta como una distribución $N(\mu, \sigma)$, se realiza una serie de tratamientos estadísticos para su correcta depuración y análisis.

Depuración de la muestra

Es posible que en una serie de datos se detecten errores, que no son absorbidos por la distribución gaussiana y deben ser eliminados de la muestra. Para ello, la teoría de errores aplica dos posibles soluciones:

1. CRITERIO 3σ

Se construye un intervalo $[\bar{V} \pm 3\sigma]$, donde la probabilidad de que un dato caiga fuera del mismo es de 0.3%. Se utiliza al tener una gran cantidad de observaciones.

2. CRITERIO DE CHAUVENET

Es preferible utilizarlo cuando se tiene una muestra de $n < 30$. Se utiliza el intervalo $[\bar{V} \pm k\sigma]$, donde $p(\bar{V} - k\sigma \leq v \leq \bar{V} + k\sigma) = 1 - \frac{1}{2n}$

El valor k se encuentra tabulado en función del número de observaciones:

n	K_n	n	K_n
2	1.15	15	2.13
3	1.38	20	2.24
4	1.54	25	2.33
5	1.65	30	2.40
6	1.73	40	2.48
7	1.80	50	2.57
8	1.86	100	2.81
9	1.92	300	3.14
10	1.96	500	3.29

Figura 2.4.4 - Cuadro de valores de Chauvenet.³²

Correlación de las variables

La independencia de las observaciones y la no correlación entre las variables, deben ser confirmadas antes de proseguir con el tratamiento. Para ello, se calcula el coeficiente de correlación de Pearson y se observa el diagrama de dispersión.

Test de normalidad

Comúnmente se asume que una serie de datos asume una distribución Normal, así mismo es conveniente verificar esta cualidad antes de calcular cualquier estadístico. Para esto, se aplica un test estadístico, por ejemplo, el de Kolmogorov-Smirnov.

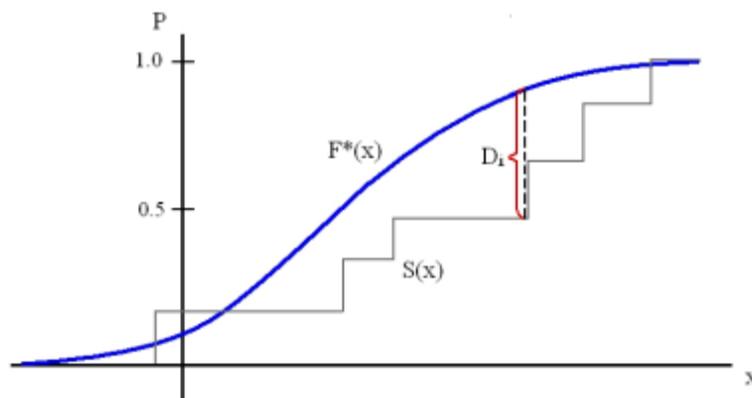


Figura 2.4.5 - Representación de la distancia D_i .³³

Este test se basa en la determinación de la máxima diferencia D_i entre las frecuencias acumuladas observadas ($S(x)$) y las frecuencias acumuladas esperadas ($F(x)$). Se proporcionan los valores críticos con un 95% de nivel de confianza:

³² Fuente: <http://www.gesdocal.es/13.html>

³³ Fuente: ATKINSON, Alean D.J. y Ariza Francisco J. 2005. "Control de Calidad posicional en cartografía: análisis de los principales estándares y propuesta de mejoras". Universidad de Jaén.

Tamaño muestral (n)	Valor límite de Kolmogorov-Smirnov ($\alpha=0.05$)
15	0.338
20	0.294
25	0.27
30	0.24
35	0.23
> 35	$1.36/\sqrt{n}$

Figura 2.4.6 - Valores límites de Kolmogorov-Smirnov para un 95% de nivel de confianza.³⁴

El análisis anterior también puede llevarse a cabo mediante el cálculo del p -valor asociado al estadístico D observado: (p -valor = $P(D > D_i / H_0 \text{ es cierta})$). Se acepta H_0 (los datos siguen una distribución Normal) cuando el p -valor $\geq \alpha$ (nivel de significancia elegido).

2.5 Control de la exactitud posicional

Siendo el control de exactitud de modelos digitales el principal objetivo de este trabajo, es inevitable desarrollar los métodos para su ejecución, y los estadísticos más utilizados en este campo.

2.5.1 Introducción a la exactitud posicional

El control de calidad geométrica tiene por objeto verificar la precisión de ortofotos y MDTs, a través de controles basados en la estadística. Se comparan las medidas proporcionadas por los modelos digitales con valores de mayor exactitud, obtenidos por observación directa en el terreno.

Recolección de la Información

Al momento de seleccionar los puntos de control del modelo geográfico a evaluar, se deben tener en cuenta los siguientes aspectos:

- Cantidad de puntos.
- Distribución sobre el área cartográfica.
- Deben ser puntos bien identificables, en modelo y terreno.

Para la observación de los puntos de control, se deben utilizar metodologías que garanticen la precisión deseada. Aplicando métodos de medición precisos y realizando las observaciones con la máxima garantía y fiabilidad, para tener la certeza de obtener datos de mayor precisión.

³⁴ Fuente: Ídem. Figura 2.4.5

Componentes de precisión geométrica

Desde el punto de vista geométrico es necesario estudiar los aspectos que hacen a la propia naturaleza de los errores. Dada una cartografía se analiza:

- Depuración de observaciones y determinación de sistematismos.
- Cumple o no la precisión requerida.
- Precisión media para el universo de puntos.

Para evaluar la calidad posicional, existen diversos test, que permiten fijar niveles de confianza para el resultado. Se basan en la comparación del mapa con una fuente de mayor exactitud.

Test estadísticos más empleados

1. **NMAS** (National Map Accuracy Standard): Estima si el modelo analizado se encuentra dentro de ciertos límites de error preestablecidos.
2. **EMAS** (Engineering Map Accuracy Standard): Se obtienen estadísticos para analizar si existen errores sistemáticos y la variabilidad de la muestra (errores aleatorios).
3. **ASPRS** (Spatial Accuracy Specification for Large Scale Topographic Maps): Se calcula el RMSE para comparar los resultados con valores tabulados.
4. **USGS** (categoría de exactitud de MDT): Se basa en una cuantificación de los niveles de exactitud, empleados posteriormente para obtener la categoría de exactitud del MDT.
5. **Fórmula de Koppe** (Alternativa al estándar NMAS): Se emplean coeficientes derivados empíricamente para estudiar los efectos de las pendientes del terreno sobre el error medio de la componente vertical.
6. **NSSDA** (National Estándar for Spatial Data Accuracy): Se obtiene por un lado el RMSE para planimetría (X, Y), y por otro, la altimetría (Z). Calcula el error real de la muestra en función de un determinado nivel de confianza.

Estos estándares se basan en entidades puntuales, sobre las que se realizan diferentes pruebas estadísticas. En todos los casos, se emplea una fuente de mayor exactitud para comparar las coordenadas de los puntos de la muestra. Estos deben estar homogéneamente distribuidos, y no pueden causar ninguna confusión en cuanto a su localización tanto sobre el modelo, como sobre la fuente de mayor exactitud.

2.5.2 Estándar NSSDA

Es de origen norteamericano, propuesto por las agencias federales de los Estados Unidos que producen datos cartográficos. Se utiliza comúnmente en el ámbito estudiantil y profesional, como un estándar que representa la calidad geométrica de datos cartográficos.

Muestra poblacional

Para poder aplicar el estadístico NSSDA, es necesario que la muestra cumpla con los siguientes requerimientos:

- Los errores (V_X, V_Y, V_Z) deben seguir una distribución Normal.
- Las coordenadas X, Y y Z deben ser independientes.
- El cociente $RMSE_{min}/RMSE_{máx}$ debe estar contenido en el intervalo $[0.6, 1.0]$ para poder calcular el error circular estándar.³⁵

En cuanto a la distribución espacial de la muestra se recomienda:

- Un mínimo de 20 puntos, perfectamente definidos y medidos con al menos 3 veces más exactitud que en el modelo.
- Una distancia entre puntos igual o mayor a 1/10 de la longitud de la diagonal (D).
- Tener al menos un 20% de la muestra en cada cuadrante.

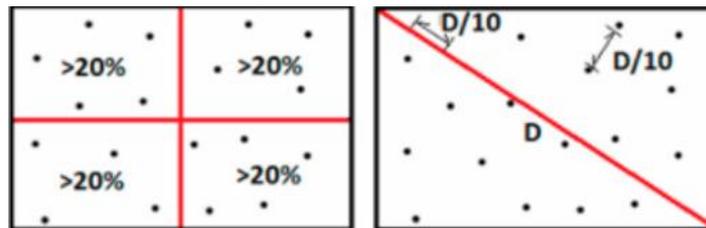


Figura 2.5.1 - Representación de la distribución muestral recomendada.³⁶

³⁵ $RMSE_{min} = \min\{RMSE_X, RMSE_Y\}$ y $RMSE_{máx} = \max\{RMSE_X, RMSE_Y\}$.

³⁶ <https://www.mdpi.com/2220-9964/8/12/552/htm>

Cálculo del NSSDA

El estadístico utiliza la raíz del error cuadrático medio (RMSE) para evaluar la exactitud posicional para un nivel de confianza del 95%. Este procedimiento se expresa en forma independiente para planimetría y altimetría.

1. CÁLCULO EN LA COMPONENTE PLANIMÉTRICA (X, Y):

- Si $RMSE_X = RMSE_Y$:

$$NSSDA_R = 1.7308 RMSE_R RMSE_R = (RMSE_X + RMSE_Y)^{0.5} = \sqrt{2} RMSE_X = \sqrt{2} RMSE_Y$$

$$\text{Entonces: } NSSDA_R = 2.4477 RMSE_X = 2.4477 RMSE_Y \quad (i)$$

- Si $RMSE_X \neq RMSE_Y$:

$$NSSDA_R \approx 2.4477 [0.5 (RMSE_X + RMSE_Y)] \quad (ii)$$

Donde, $RMSE_X$ y $RMSE_Y$ representan el $RMSE$ de las coordenadas X e Y respectivamente, y $RMSE_R$ el planimétrico de una muestra de puntos.

2. CÁLCULO EN LA COMPONENTE ALTIMÉTRICA Z:

$$NSSDA_Z = 1.9600 RMSE_Z \quad (iii)$$

Donde, $RMSE_Z$ representa el $RMSE$ de las coordenadas Z de una muestra de puntos.

CAPÍTULO 3 - Marco Metodológico y Campaña de Medición

3.1 METADATOS DE LOS PAQUETES DE DATOS

3.1.1 Imágenes satelitales y MDT de la IDEuy

El antecedente para la información geográfica del país, data de medio siglo atrás; cartografía a escala 1:50.000, creada por el Servicio Geográfico Militar a partir de un vuelo con cobertura nacional con más de 80.000 fotografías. Actualmente ha quedado desactualizada y con inconsistencias, por ende, en los años 2017-2018 se realiza un relevamiento fotogramétrico para actualizar la información geográfica del País.

Elaboración de los productos

El vuelo se lleva a cabo a una altura de entre 2.000-3.000m sobre los centros poblados y 8.000m sobre el resto del país. Las fotografías son tomadas con una resolución espacial de 32cm para todo el territorio nacional y 10cm para los centros urbanos (no todos), generando bases cartográficas en escalas 1:10.000 y 1:1.000 respectivamente. Los datos planimétricos están en el sistema de referencia SIRGAS-ROU98 UTM21S (EPSG:5382) y altimétricamente las cotas ortométricas referidas al modelo de geoide EGM2008 (EPSG:3855).

Obtención de los productos

A través de los Geoservicios web de la IDEuy se puede acceder a diversos conjuntos de datos, en particular ortofotos y MDT, y sus correspondientes paquetes de metadatos.

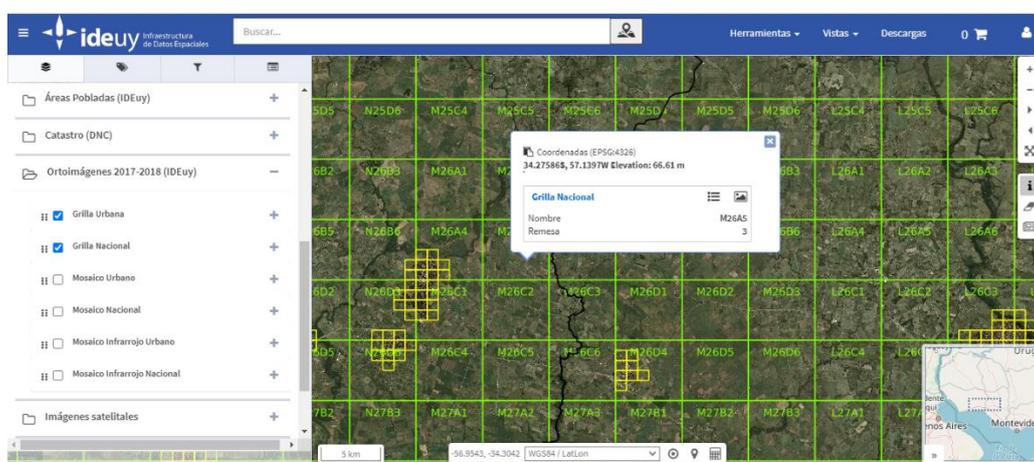


Figura 3.1.1 - Visualizador de la IDEuy.³⁷

³⁷ https://visualizador.ide uy/ideuy/core/load_public_project/ideuy/

El visualizador permite además realizar las descargas de los modelos, a partir del identificador de la grilla del área de interés (Remesa y Nombre de Hoja³⁸).

Para conocer el número de Remesa y Nombre de Hoja es necesario seleccionar los layers: *Grilla Urbano y Nacional* del Panel de Control del Visualizador, y utilizar la herramienta *Información en el Punto (I)* para acceder a su identificador completo. Posteriormente, se selecciona *Herramientas / Descargas* y se busca el archivo antes determinado para comenzar la descarga.

3.1.2 MDT del MGAP-RENARE

Elaboración del MDT

Se crea a partir de la cartografía a escala 1:50.000 del Servicio Geográfico Militar, donde se transforma los ejes de agua en una hidrografía orientada, direccionando el sentido de la circulación del flujo de agua hacia la salida de cada cuenca hidrográfica, para ello, se utiliza como referencia un TIN desarrollado por el IGM. Se presenta en formato ráster con una resolución espacial de 30x30m y una precisión de interpolación entre puntos de 2,5m. Los datos altimétricos están referidos al Cero Oficial.

Obtención del MDT

Se encuentra disponible en la página web del MGAP, el procedimiento de descarga se realiza de forma sencilla: En la pestaña de “*Trámites y Servicios*” - “*Servicios*”, se selecciona la opción “*Modelo digital de Terreno*” - “*Enlace servicio en línea*”, y finalmente “*Descarga del Modelo*”.

El modelo descargado es único para la totalidad de la superficie del país, por lo que la selección del área de interés se realiza directamente en el software GIS.

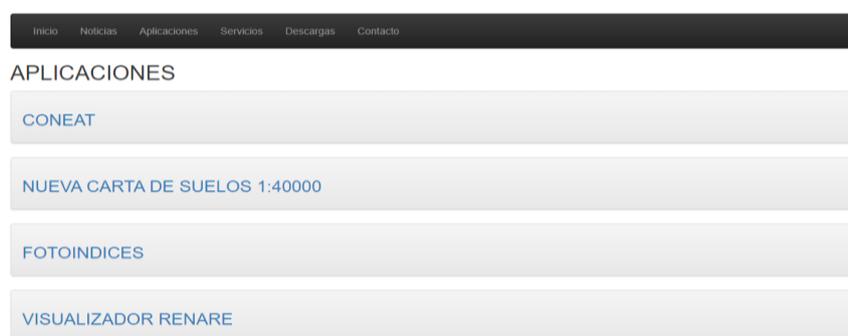


Figura 3.1.2 - Servicios de Página Web del MGAP. ³⁹

³⁸ REMESA: Área pre-diseñada que divide en 12 partes la cobertura del territorio nacional y en 10 la cobertura urbana. Cada una está compuesta por hojas, un rectángulo generado en base a la cuadrícula definida por el Plan Cartográfico Nacional (Remesas Nacionales 5x5 km y Urbanas 1x1 km).

³⁹ <http://web.renare.gub.uy/sitio/aplicaciones.html>

3.1.3 MDT Global

Introducción a los productos MDTs globales

De una gran variedad de productos disponibles a nivel global, se escoge la plataforma Land Viewer⁴⁰. Esta es una plataforma gratuita desarrollada por EOS (Earth Observing System), la que permite la descarga de archivos GeoTIFF, disponibles para su uso en SIG y análisis 3D.

El visualizador de la plataforma trabaja con imágenes satelitales Landsat y Sentinel, y además cuenta con archivos MDE también como producto satelital.

Obtención del MDT global

La resolución del MDE a descargar se determina según el nivel de escala en la vista, disponiendo de 14 niveles de resolución espacial. Las resoluciones abarcan desde los 10.000m a los 5m a partir de fragmentos de mosaicos de 512×512.

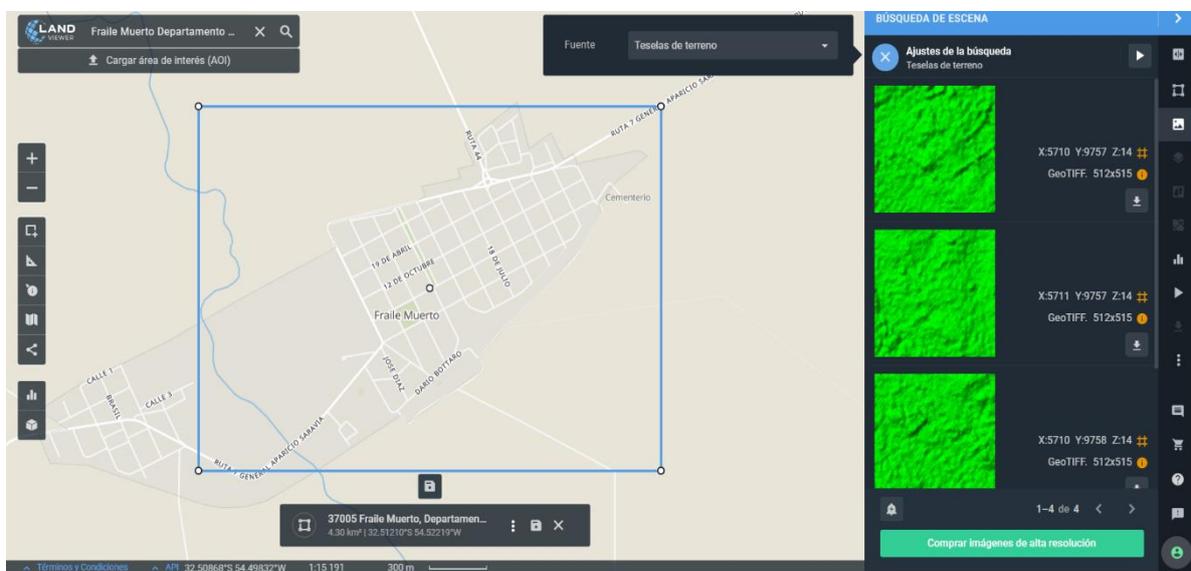


Figura 3.1.3 - Visualizador Land Viewer.⁴¹

Se utiliza el buscador para localizar la zona de interés, luego se delimita la misma con un polígono y se ajusta la escala de la imagen.

Se accede a la pestaña “buscador de escena” - “ajuste de la búsqueda” - “fuente: teselas de terreno”, desplegándose todos los fragmentos de mosaicos disponibles para el área seleccionada (ver Figura 3.1.3).

⁴⁰ <https://eos.com/landviewer/>

⁴¹ <https://eos.com/landviewer/>

3.2 ZONA DE ESTUDIO

3.2.1 Elección de la Zona de estudio

Teniendo en cuenta que los modelos de la IDEuy se dividen en zonas rurales y urbanas, se entiende pertinente realizar el estudio en dos ubicaciones, contemplando ambas categorías. Por consiguiente, se escogen las localidades natales de los suscriptos, Nueva Helvecia en el departamento de Colonia y Fraile Muerto en el departamento de Cerro Largo, las cuales coincidentemente, se encuentran mapeadas con carácter urbano y rural, respectivamente.

Realizar un trabajo en estas localidades y generar información relevante, tiene además el valor agregado de ser de utilidad para el futuro ejercicio de la profesión, sacándole así el máximo provecho a este proyecto.

ZONA I (Colonia - Nueva Helvecia)

La Ciudad de Nueva Helvecia o Colonia Suiza, se encuentra localizada al Sur-Este del departamento de Colonia, en el cruce de las Rutas 52 y 53. A pocos kilómetros al Norte de la Ruta 1, y a una distancia de 120km de Montevideo y 60km de Colonia del Sacramento.

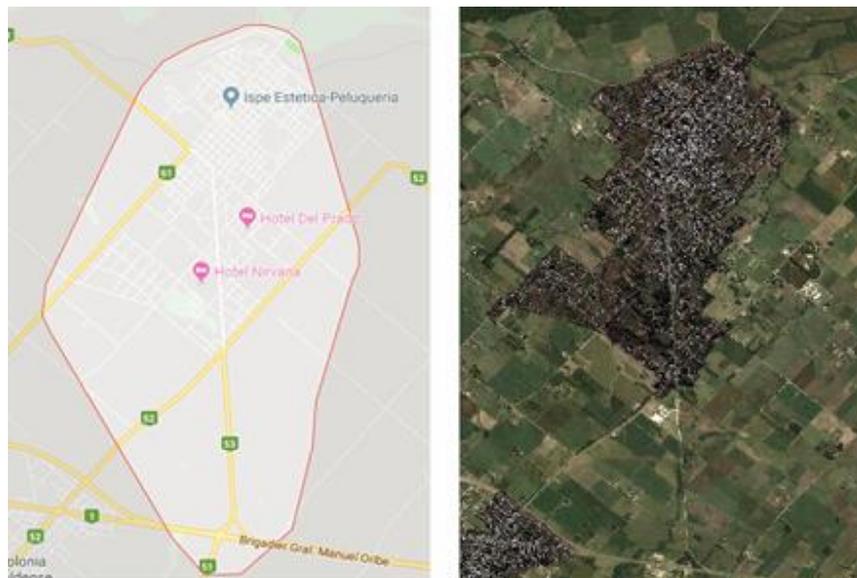


Figura 3.2.1 - Ubicación de la ciudad de Nueva Helvecia, Colonia.

La misma posee una superficie municipal de 95km², comprendida en su totalidad por la Localidad Catastral de Nueva Helvecia y la 10^a Sección Judicial de Colonia.

Esta ciudad presenta en su mayoría un desarrollo rural, fruticultura y ganadería-lechera, con algunos establecimientos agrícolas. Referente al conurbano se aprecia una arquitectura colonial europea, con plazas verdes y avenidas principales típicas del departamento.

ZONA II (Cerro Largo - Fraile Muerto)

La Ciudad de Fraile Muerto se encuentra localizada en el centro del departamento de Cerro Largo, sobre las costas del arroyo Fraile Muerto y sobre la Ruta 7, Kilómetro 345, a 41km de Melo.

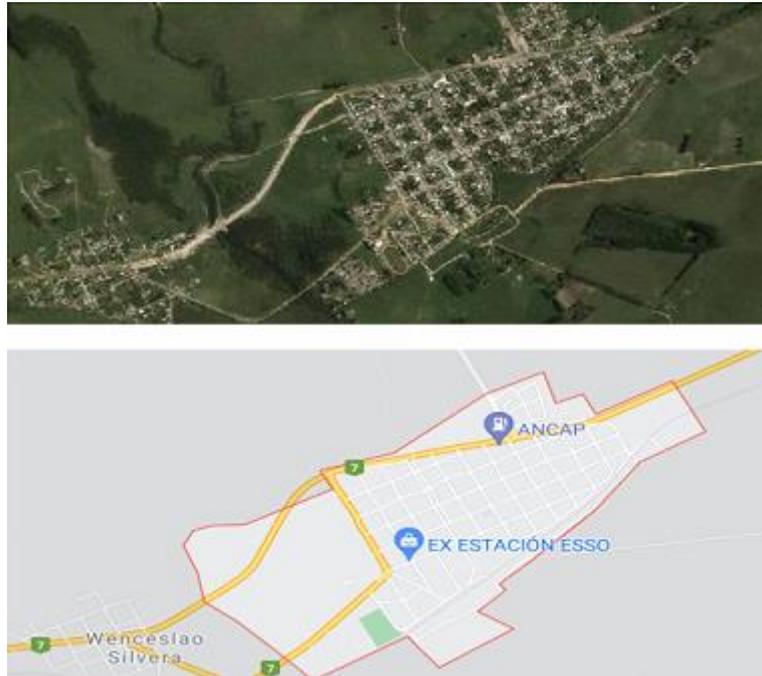


Figura 3.2.2 - Ubicación de la ciudad de Fraile Muerto.

Este territorio, con superficie municipal de 407 km², está comprendido dentro de la Localidad Catastral de Fraile Muerto y la 6^a y 7^a Secciones Judiciales de Cerro Largo.

La ciudad está formada por dos fracciones separadas por el arroyo Fraile Muerto, al Oeste la fracción Wenceslao Silveira (7^a Secc. Judicial) y al Este la fracción Fructuoso Mazziotta (6^a Secc. Judicial), ambos nombres de los fundadores de dichos poblados.

Se ubica en el corazón de una amplia zona rural con grandes desarrollos agrícolas ganaderos, y extensas áreas destinadas a la forestación. Dentro de la ciudad, se presenta como atractivo turístico el propio Arroyo Fraile Muerto, cuyo parque es visitado por personas de todo el departamento.

3.3 PLANIFICACIÓN DEL TRABAJO DE CAMPO

En este apartado se desarrolla el proceder durante las tareas de campo, donde se plantea realizar dos estudios independientes. El estudio central de este trabajo, la verificación de la calidad posicional de los modelos de la IDEuy, y un estudio previo, donde se comparan diferentes métodos de medición para determinar cuál utilizar en el mismo.

Primer Estudio

Se realiza una comparación de metodologías de observación GNSS: *Diferencial en tiempo real con base permanente del IGM, con base auxiliar con coordenadas conocidas, y con base VRS*. Para este fin, se considera una muestra reducida de puntos, con la cual no se pretende extraer conclusiones sobre exactitud y precisión de medición de cada metodología, pero se espera observar una tendencia en los resultados y adoptar criterios sobre la metodología a utilizar.

Segundo Estudio

Se realiza el levantamiento de los puntos necesarios para realizar el control de calidad geométrica de los modelos de la IDEuy. La elección de la metodología es seleccionada en relación a los resultados obtenidos en el primer estudio, optando por el método *Diferencial en tiempo real con base auxiliar* como metodología principal de observación.

3.3.2 Métodos de observación

Considerando la extensa área a relevar y amplia distribución de los puntos, es indispensable la utilización de metodologías GNSS como herramienta de observación. Lo que se complementa con el hecho de que las precisiones requeridas para lograr el cometido de este estudio, quedan cubiertas por el rango de precisión de la tecnología GNSS.

Los métodos de captura a utilizar, se describen a continuación:

1. DIFERENCIAL ESTÁTICO

Se realiza la medición de un punto por un período prolongado de tiempo, varias horas de ser posible, grabando datos crudos. Posteriormente se post-procesan con datos crudos de una estación del IGM, obteniendo una solución diferencial de mayor precisión.

En este trabajo se emplea para obtener la posición de la base auxiliar, punto elemental para algunos de los métodos a utilizar, por lo que se necesita gran precisión y exactitud en sus coordenadas.

2. DIFERENCIAL ESTÁTICO-RÁPIDO

Se cuenta con un receptor base estacionado sobre el punto auxiliar, y un receptor móvil con el que se ejecuta la toma de puntos, realizando la medición durante 20 minutos.

Esta metodología se emplea en el primer estudio, para determinar las coordenadas de los puntos a ser utilizados como base de comparación para los demás métodos.

3. DIFERENCIAL EN TIEMPO REAL (RTK)

Esta metodología se emplea en distintos formatos según la base utilizada. Para cada punto, las observaciones se realizan de igual manera, todas durante un tiempo de 10 segundos.

- *Bases permanentes IGM:* Se utiliza un receptor GNSS, conectado al servicio de posicionamiento a tiempo real del IGM⁴², obteniendo correcciones a través del protocolo Ntrip, vía internet, de una estación permanente. Se busca, siempre que sea posible, la conexión a la estación permanente más cercana. Adicionalmente se realiza la captura conectado a una base lejana, con el fin de evidenciar los efectos de la distancia base-receptor.
- *Base Auxiliar:* Es el clásico método diferencial con dos receptores GNSS, uno fijo utilizado como base sobre el punto auxiliar, y uno móvil que realiza las observaciones en campo, conectados por radio enlace.
- *Base VRS IGM:* Se utiliza un receptor GNSS, conectado vía internet a los servicios de VRS del IGM⁴³, según la celda correspondiente, creando una base virtual próxima al área de trabajo.

Las precisiones obtenidas con esta metodología en sus diferentes formatos, son comparadas en el primer estudio. Independientemente del resultado del mismo, el método RTK con base auxiliar, se utiliza nuevamente en el segundo estudio como principal metodología de observación.

3.3.3 Equipos de medición

Teniendo en cuenta los procedimientos descritos, es evidente la necesidad de contar con al menos 2 equipos receptores GNSS, una controladora y los implementos necesarios para la construcción de un receptor base (antena, emisor de radiofrecuencia, fuente, etc.).

Es así, que se logra contar con los siguientes equipos:

- 1 Receptor Base (Trimble R4) + Equipo radio.
- 1 Receptor Móvil (Trimble R4).
- 1 Controladora (Trimble TDC600).

⁴² <https://igm.gub.uy/geoportal/instructivos-2/>

⁴³ <https://igm.gub.uy/geoportal/informacion-gral-estaciones/>



Figura 3.3.1 - Receptores GNSS + equipo radio utilizado.



Figura 3.3.22 - Controladora GNSS utilizada

3.3.4 Muestra Poblacional

Primer estudio

Con respecto al tamaño de la muestra, se establece un tamaño de 10 puntos, cantidad suficiente para lograr el cometido de este primer estudio. Se seleccionan puntos distribuidos homogéneamente dentro de cada zona, bien definidos en campo y en los modelos digitales.

Es interesante incluir en la muestra puntos de control y apoyo utilizados en la construcción y evaluación de los modelos de la IDEuy.

1. ZONA I- Nueva Helvecia

En la Zona I se logran visualizar 7 puntos de control y apoyo de la IDEuy. De éstos, se seleccionan 4, por accesibilidad y distribución, y los puntos restantes para completar la muestra se toman del Segundo Estudio.



Figura 3.3.3 - Puntos de apoyo (izquierda) y control (derecha), ciudad de Nueva Helvecia.

Los puntos se encuentran numerados según el caminamiento a realizar en el Segundo Estudio, a excepción de los puntos de apoyo y control, los cuales se numeran del 70 en adelante, para ser fácilmente distinguidos.



Figura 3.3.4 - Muestra de puntos para la Zona I.

En la Figura 3.3.4 se observa la ubicación de la base auxiliar (triángulo verde). Posicionada próxima al centro del área de estudio, para disminuir los efectos provocados por la distancia entre base y móvil.

2. ZONA II- Fraile Muerto

Para la Zona II, no se cuenta con puntos de control ni apoyo de la IDEuy dentro del área seleccionada, los más cercanos se encuentran a 17km y 13km respectivamente.

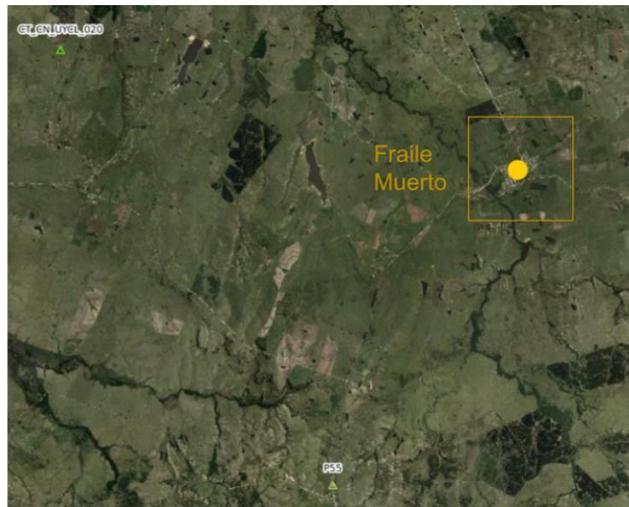


Figura 3.3.5 - Puntos de apoyo y control, ciudad de Fraile Muerto.

Por lo tanto, los puntos son seleccionados en su totalidad de la muestra del Segundo Estudio, siguiendo también, con la misma numeración.

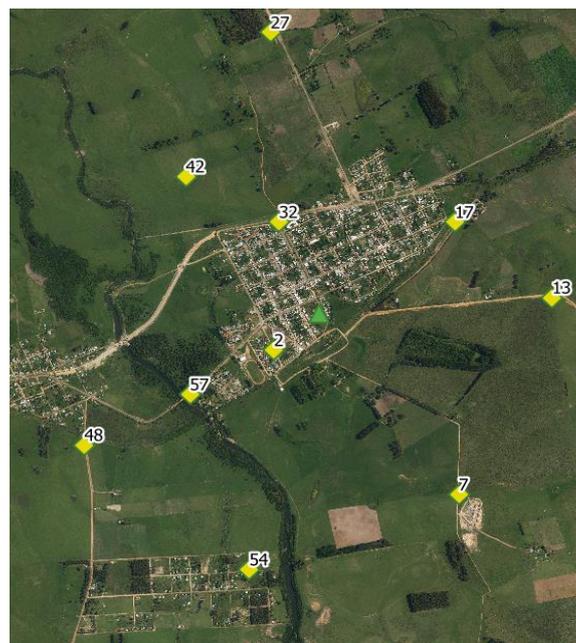


Figura 3.3.6 - Muestra de puntos para la Zona II.

Se determina, además, la ubicación de la base auxiliar, procurando también para esta zona, se encuentre en una posición aproximadamente central en lo que respecta al área de estudio.

Segundo estudio

CANTIDAD DE PUNTOS

La Federal Geographic Data Committee (FGDC) recomienda utilizar por lo menos 20 puntos de control, independientemente del área de estudio. Sin embargo, no establece una cantidad específica, ni recomendaciones al respecto.

En la búsqueda de antecedentes, se encuentra con condiciones semejantes a las de este trabajo, el redactado por el Ing. Fabián D. Barbato, el cual utiliza una muestra próxima a los 50 puntos para evaluar la calidad posicional de la cartografía 1:1000, base del “Montevimap”.

No conformes con utilizar solamente estas recomendaciones, se procede a determinar la cantidad de puntos a partir de conceptos matemáticos:

Partiendo de la Teoría de Errores de Gauss⁴⁴ y contando con una muestra tomada previamente, se determina la cantidad de puntos necesarios:

Considerando la *Ec.*: $I\alpha(v) = \bar{V} \pm \varepsilon$, con $\varepsilon = \frac{s}{\sqrt{n}} Z_{\alpha/2}$ (error máximo de estimación),

y despejando n , se obtiene: (i) $n = \frac{s^2 (Z_{\alpha/2})^2}{\varepsilon^2}$

Para este cálculo se utilizan la desviación estándar (s) y el promedio de las observaciones (\bar{V}) del proyecto de grado de la Ing. Agrim. Katherine Lesparre, y se establece el error máximo admisible (ε) igual al 20% de \bar{V} .

Resultando,

$$\left. \begin{array}{l} Z_{\alpha/2} = 1.96 \\ s = 0.06m \\ \varepsilon = 0.02m \end{array} \right\} \rightarrow n = 50$$

Se observa que la cantidad resultante para la muestra poblacional, coincide con la expresada en el antecedente mencionado. Al igual que en el mismo, se entiende prudente seleccionar un tamaño de muestra mayor para su correcta depuración, por lo que finalmente se decide seleccionar 65 puntos.

El cálculo anterior está basado en una muestra del modelo de la IDE urbana, por lo tanto, es aplicable para una selección de igual característica (Zona I). Respecto a la cantidad de puntos sobre una

⁴⁴ Ver apartado 2.4.3 *Estadística inferencial*

zona rural (Zona II), no se cuenta con ninguna muestra previa que pueda ser utilizada para el cálculo, por lo que se asume la misma cantidad que para la zona urbana, al ser ésta más restrictiva.

ELECCIÓN, DISTRIBUCIÓN Y CAMINAMIENTO

Para realizar la composición de la muestra, se seleccionan objetos en función del tamaño del píxel, que puedan ser diferenciados en las ortoimágenes de forma inequívoca; como canteros bajos, tapas de drenaje y baldosas para el caso urbano; y cruces de alambrados, elementos de construcción y veredas, para el caso rural. Se selecciona inicialmente un número mayor de puntos a los requeridos para la muestra, con el fin de ser refinada y lograr una distribución homogénea del área de estudio.

Por último, se diseña el caminamiento a seguir en campo, optimizando el tiempo entre observaciones y reduciendo la duración total de la jornada de trabajo.

1. ZONA I - Nueva Helvecia

Para lograr una distribución uniforme de la muestra, se selecciona una cantidad superior de puntos a la necesaria (130 puntos fotoidentificables), que luego se depuran mediante un muestreo aleatorio simple (MAS) condicionado a la distancia, reduciendo la muestra a 66 puntos.

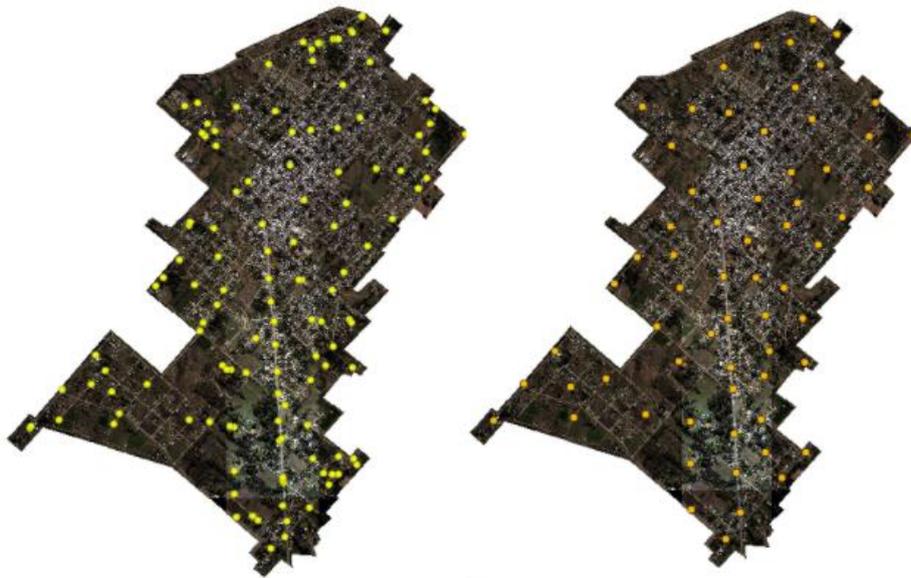


Figura 3.3.7 - 130 puntos Fotoidentificables / 66 Puntos seleccionados por MAS, para la Zona I.

Para determinar el caminamiento se modela el problema como una red y se resuelve usando la extensión *Análisis de Red* en el software QGIS, el desplazamiento entre punto se realiza por las calles.

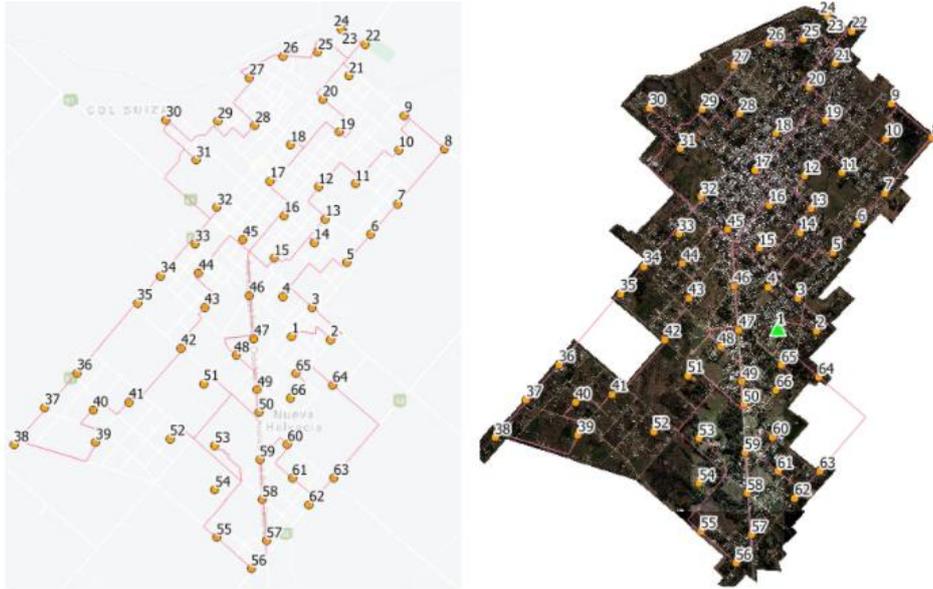


Figura 3.3.8 - Caminamiento del Relevamiento para la Zona I.

2. ZONA II- Fraile Muerto

Para lograr la uniformidad en la distribución de los puntos, se seleccionan inicialmente 200 puntos fotoidentificables. Para refinar esta muestra, se crea una malla regular de 70 puntos (para cubrir zonas con escasez de puntos) y se utiliza la herramienta de “*puntos cercanos*” en QGIS, seleccionando para cada uno de los 70 puntos, el más cercano perteneciente a la muestra inicial. Luego de eliminar los puntos repetidos, se llega a una muestra final de 60 puntos.



Figura 3.3.9 - 200 puntos Fotoidentificables / 60 Puntos seleccionados por distancia a una malla.

El recorrido a realizar para la captura de puntos se divide en 4 regiones, realizando un caminamiento individual dentro de cada una. La diferenciación por zonas, se hace debido a la accesibilidad a los puntos, al encontrarse la mayor parte de ellos campo adentro, divididos por el arroyo Fraile Muerto y pertenecientes a la propiedad privada.

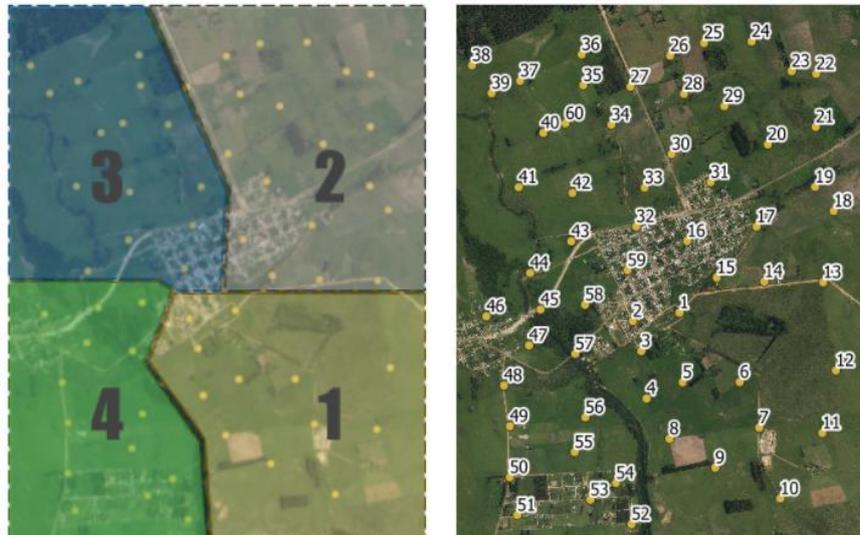


Figura 3.3.10 - Caminamiento del Relevamiento para la Zona I.

3.3.5 Tratamiento

Se debe tener en cuenta, antes de realizar cualquier análisis estadístico y operaciones entre coordenadas, que los datos utilizados estén en el mismo sistema de referencia de coordenadas (SRC). Para omitir el paso de un sistema de coordenadas a otro (transformación de coordenadas) se configura el trabajo en la controladora GNSS con el SRC SIRGAS-ROU98 proyección UTM21S y se carga el modelo geoidal EGM2008, para el cálculo de las cotas ortométricas.

Tratamiento Primer Estudio

Al utilizar una muestra reducida de puntos, relevados de forma meticulosa, no es conveniente depurar la misma, por tanto, se calculan directamente los diferenciales absolutos de las observaciones.

Tratamiento Segundo Estudio

Dada la muestra obtenida, se procede de la siguiente manera:

- Se depuran las observaciones según el criterio de Chauvenet.
- Se calcula la correlación de Person para las variables X e Y.
- Se realiza el test de normalidad.

- Se expresan los intervalos al 95% de confianza:

$$I\alpha(v)_1 = [\bar{V} - 1.96 s, \bar{V} + 1.96 s] \quad I\alpha(v)_2 = \left[\bar{V} - 1.96 \frac{s}{\sqrt{n}}, \bar{V} + 1.96 \frac{s}{\sqrt{n}} \right]$$

- Adicionalmente, se calcula el estadístico NSSDA.

El intervalo de confianza $I\alpha(v)_1$ y el estadístico NSSDA se basan en los mismos fundamentos estadísticos, y representan la calidad posicional en diferentes formatos. El intervalo de confianza acota las observaciones por el máximo y mínimo valor, y el NSSDA representa el máximo valor del 95% de los datos, equivalente al máximo extremo del intervalo de confianza anterior.

CAPÍTULO 4 - Exposición de Resultados

En este capítulo se exponen los resultados obtenidos a partir de las metodologías y procedimientos descritos anteriormente.

4.1 Trabajo de Campo

Se selecciona la salida de campo a la Zona I (Nueva Helvecia) como primera experiencia debido a la cercanía actual de los suscriptos. Por si acaso, son necesarios más días de medición que los planeados, o surgen inconvenientes que obliguen a realizar una segunda campaña. De esta forma, planificar acertadamente la salida a la Zona II (Fraile Muerto), optimizando el tiempo en campo.

4.1.1 Primer Estudio: Comparativa de técnicas GNSS para determinar los puntos de apoyo

1. ZONA I- Nueva Helvecia

El trabajo de campo comienza con la observación mediante el método Estático de la base auxiliar durante aproximadamente 7hrs, la cual se postprocesa con UYSJ (Base permanente del IGM de San José) utilizando las efemérides ultra-rápidas⁴⁵. En simultáneo, se realizan las observaciones de los 10 puntos que componen la muestra, que luego se post procesan con la base auxiliar.



Figura 4.1.1 - Ubicación de la base auxiliar para la Zona I.

⁴⁵ <https://cddis.nasa.gov/archive/gnss/products/>

Se plantea realizar todas las observaciones de las metodologías en una sola puesta de estación del receptor móvil para cada uno de los puntos. Sin embargo, esta acción no es posible, debido a la mala recepción de la señal VRS y la falta de potencia en la señal de radio-frecuencia, por lo que es necesario una segunda estación para estos dos métodos.

En esta zona corresponde utilizar las bases del Instituto del Geográfico Militar UYSJ (50 Km de distancia) y UYCO (60 Km de distancia), y la VRS K.



Figura 4.1.2 - Puntos pertenecientes a la muestra comparativa.

Tabla de datos de campo

En los puntos de apoyo en el primer estudio las coordenadas planas (X,Y) se encuentran en el sistema de referencia SIRGAS-ROU98, proyección UTM zona 21S y para la altimetría se utilizan las alturas elipsoidales (h).

Datos 1er Estudio					
Pto.	Método de obs.	Este	Norte	h	OBS
Base Aux.	Post Proceso	478722.35	6204828.83	62.37	-
10	Post Proceso	479661.82	6206472.47	43.68	-
	RTK Radio	479661.80	6206472.48	43.67	-
	Ntrip San José	479661.81	6206472.45	43.76	-
	Ntrip Colonia	479661.72	6206472.42	43.74	Flotante
	VRS	479661.79	6206472.46	43.73	-
30	Post Proceso	477616.19	6206741.31	42.35	-
	RTK Radio	477616.18	6206741.32	42.39	-
	Ntrip San José	477616.22	6206741.29	42.42	-
	Ntrip Colonia	477616.17	6206741.31	42.53	Flotante
	VRS	477616.17	6206741.34	42.49	-

37	Post Proceso	476548.46	6204196.53	49.28	-
	RTK Radio	-	-	-	-
	Ntrip San José	476548.57	6204196.56	49.42	-
	Ntrip Colonia	476548.40	6204196.51	49.35	-
	VRS	476548.48	6204196.50	49.35	-
44	Post Proceso	-	-	-	-
	RTK Radio	477899.55	6205382.58	53.63	-
	Ntrip San José	477899.60	6205382.57	53.65	-
	Ntrip Colonia	477899.56	6205382.55	53.57	Flotante
	VRS	-	-	-	-
52	Post Proceso	477636.23	6203903.60	51.66	-
	RTK Radio	477636.23	6203903.61	51.66	-
	Ntrip San José	477636.27	6203903.62	51.74	-
	Ntrip Colonia	477636.24	6203903.66	51.71	Flotante
	VRS	-	-	-	-
55	Post Proceso	478060.47	6203049.25	69.14	-
	RTK Radio	478060.46	6203049.24	69.15	-
	Ntrip San José	478060.49	6203049.27	69.24	-
	Ntrip Colonia	478060.44	6203049.28	69.19	-
	VRS	478060.47	6203049.23	69.16	-
71	Post Proceso	478455.75	6203738.31	70.38	-
	RTK Radio	478455.75	6203738.31	70.37	-
	Ntrip San José	478455.82	6203738.29	70.40	-
	Ntrip Colonia	478455.81	6203738.46	70.39	Flotante
	VRS	478455.76	6203738.31	70.44	-
73	Post Proceso	478953.90	6206144.40	56.21	-
	RTK Radio	478953.89	6206144.39	56.19	-
	Ntrip San José	478953.91	6206144.38	56.29	-
	Ntrip Colonia	478953.89	6206144.36	56.30	Flotante
	VRS	478953.90	6206144.38	56.27	-
74	Post Proceso	479368.42	6207420.81	37.53	-
	RTK Radio	-	-	-	-
	Ntrip San José	479368.42	6207420.89	37.71	Flotante
	Ntrip Colonia	-	-	-	-
	VRS	-	-	-	-
75	Post Proceso	478566.48	6206702.15	59.52	-
	RTK Radio	-	-	-	-
	Ntrip San José	478566.50	6206702.14	59.68	-
	Ntrip Colonia	478566.36	6206702.06	59.38	Flotante
	VRS	478566.48	6206702.14	59.58	-

Tabla 4.1.1 - Resultados de Campo en la Zona I, para el 1er. Estudio.

Como se aprecia en la *Tabla 4.1.1*, no es posible realizar las observaciones previstas en todos los puntos debido principalmente a los problemas ya mencionados y que no son resueltos con la segunda estación. Presentando mayores inconvenientes los puntos 44 y 74, siendo eliminados de la muestra final por falta de datos para el posterior análisis.

2. ZONA II- Fraile Muerto

Se comienza, al igual que en la ZONA I, con la observación mediante el método Estático de la base auxiliar por aprox. 7hrs, la cual se postprocesa con UYCL (Base permanente del IGM de Cerro Largo) utilizando las efemérides ultra-rápidas. En simultáneo, se realizan las observaciones de los 10 puntos que componen la muestra, que luego se post procesan con la base auxiliar.

A continuación, se procede a realizar las observaciones por método diferencial en tiempo real, utilizando las bases del IGM UYCL (35 Km de distancia) y UYTT (Base de Treinta y Tres, ubicada a unos 80 Km de distancia), y la VRS B.



Figura 4.1.3 - Base Auxiliar en la Zona II.

Todas las observaciones son realizadas desde una sola puesta de estación para cada uno de los puntos, teniendo en cuenta los inconvenientes ocurridos durante la salida a campo en la Zona I.



Figura 4.1.4 - Puntos pertenecientes a la muestra comparativa en la ZONA II.

Tabla de datos de campo

Las coordenadas planas (X,Y) se encuentran en el sistema de referencia SIRGAS-ROU98 UTM21S y en altimetría se utilizan las alturas elipsoidales (h).

Datos 1er Estudio					
Pto.	Método de obs.	Este	Norte	h	OBS
Base Aux.	Post Proceso	732853,37	6399885,09	151,62	-
2	PostProceso	-	-	-	-
	RTK Radio	732581,91	6399649,90	143,25	-
	Ntrip Cerro Largo	732581,87	6399649,89	143,28	-
	Ntrip Treinta y Tres	732581,95	6399649,74	144,36	Flotante
	VRS	732581,86	6399649,89	143,32	-
7	PostProceso	733699,71	6398715,14	144,74	-
	RTK Radio	733699,72	6398715,14	144,73	-
	Ntrip Cerro Largo	733699,69	6398715,13	144,78	-
	Ntrip Treinta y Tres	733699,71	6398715,09	145,00	-
	VRS	733699,70	6398715,13	144,79	-
13	PostProceso	734265,15	6399990,37	164,82	-
	RTK Radio	734265,12	6399990,37	164,83	-
	Ntrip Cerro Largo	734265,14	6399990,38	164,83	-
	Ntrip Treinta y Tres	734265,14	6399990,33	164,78	Flotante
	VRS	734265,13	6399990,37	164,84	-
17	PostProceso	733676,32	6400478,54	154,08	-
	RTK Radio	-	-	-	-
	Ntrip Cerro Largo	733676,33	6400478,55	154,08	-
	Ntrip Treinta y Tres	733676,28	6400478,55	154,10	-
	VRS	733676,31	6400478,55	154,08	-
27	PostProceso	732561,97	6401705,48	158,63	-
	RTK Radio	732561,96	6401705,47	158,66	-
	Ntrip Cerro Largo	732561,96	6401705,49	158,54	-
	Ntrip Treinta y Tres	-	-	-	-
	VRS	732561,95	6401705,47	158,63	-
32	PostProceso	732612,42	6400479,42	147,54	-
	RTK Radio	732612,42	6400479,43	147,52	-
	Ntrip Cerro Largo	732612,41	6400479,41	147,50	-
	Ntrip Treinta y Tres	732612,48	6400479,44	147,54	Flotante
	VRS	732612,40	6400479,41	147,52	-
42	PostProceso	732047,74	6400773,07	140,86	-
	RTK Radio	-	-	-	-
	Ntrip Cerro Largo	732047,74	6400773,07	140,81	-
	Ntrip Treinta y Tres	732047,74	6400773,14	141,01	Flotante
	VRS	732047,73	6400773,06	140,84	-

48	PostProceso	731442,62	6399085,36	147,88	-
	RTK Radio	731442,60	6399085,37	147,88	-
	Ntrip Cerro Largo	731442,61	6399085,38	147,86	-
	Ntrip Treinta y Tres	-	-	-	-
	VRS	731442,62	6399085,34	147,94	-
54	PostProceso	732433,50	6398230,22	146,53	-
	RTK Radio	732433,49	6398230,20	146,55	-
	Ntrip Cerro Largo	732433,48	6398230,16	146,59	-
	Ntrip Treinta y Tres	-	-	-	-
	VRS	732433,48	6398230,18	146,59	-
57	PostProceso	732073,26	6399363,57	141,73	-
	RTK Radio	-	-	-	-
	Ntrip Cerro Largo	732073,25	6399363,56	141,75	-
	Ntrip Treinta y Tres	732073,25	6399363,56	141,81	-
	VRS	732073,25	6399363,55	141,77	-

Tabla 4.1.2 - Resultados de Campo en la Zona II, para el 1er. Estudio.

Nuevamente, no se realizan las observaciones previstas en todos los puntos. En este caso debe ser eliminado de la muestra final únicamente el punto 2 por falta de datos para el post-proceso.

4.1.2 Segundo Estudio: Evaluación de la calidad posicional

1. ZONA I- Nueva Helvecia

Se coloca la base auxiliar y se realizan las observaciones RTK de los puntos de la muestra, al conectar la base auxiliar se deja la radio-frecuencia con una potencia de emisión muy baja, por lo que no se logran observar los puntos más alejados a la base con éste método. Se opta entonces por tomar estos puntos mediante diferencial por Ntrip, dado que igualmente se espera obtener mayor precisión que la exigida por el estudio.



Figura 4.1.5 - Puntos pertenecientes a la muestra en la Zona I.

En campo, surge la necesidad de modificar la ubicación de algunos puntos de la muestra debido a su mala materialización, tomando un punto cercano de manera que no afecte a la distribución homogénea de la muestra. Simultáneamente se verifica su correcta visualización en las ortoimágenes de la IDEuy en QGIS.

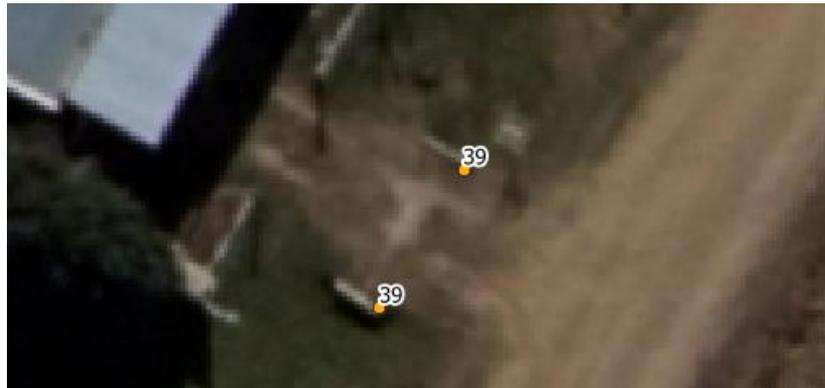


Figura 4.1.6 - Punto 39 modificado de la muestra en la Zona I.

Tabla de datos de campo

Las coordenadas planas (X,Y) se encuentran en el sistema de referencia SIRGAS-ROU98 UTM21S y en altimetría se utiliza las cotas ortométricas (H), modelo geoidal EGM2008.

Datos 2do Estudio				
Pto.	Este	Norte	H	OBS
1	-	-	-	-
2	479065.20	6204799.58	47.55	RTK
3	478897.63	6205083.35	41.02	RTK
4	478628.29	6205190.38	45.93	RTK
5	479205.10	6205479.55	38.61	RTK
6	479420.35	6205726.26	39.92	RTK
7	479654.10	6206001.62	30.40	RTK
8	480065.45	6206480.84	25.52	RTK
9	479679.28	6206821.88	25.25	RTK
10	479661.80	6206472.48	27.57	RTK
11	479279.60	6206173.95	30.03	RTK
12	478955.66	6206146.48	39.90	RTK
13	479017.95	6205864.01	32.83	RTK
14	478919.34	6205657.23	43.65	RTK
15	478567.83	6205519.06	45.64	RTK
16	478628.19	6205921.18	43.02	RTK
17	478527.16	6206220.42	42.71	RTK
18	478710.93	6206519.34	36.86	RTK
19	479143.13	6206631.82	31.54	RTK
20	478993.86	6206923.04	34.28	RTK
21	479223.85	6207128.11	26.18	RTK
22	-	-	-	-
23	-	-	-	-
24	-	-	-	-
25	478951.50	6207337.52	31.29	UYSJ
26	478645.27	6207305.86	23.03	UYSJ
27	478346.20	6207113.75	27.86	UYSJ
28	478399.62	6206691.47	36.08	UYSJ
29	478069.06	6206727.93	24.79	UYSJ
30	477616.18	6206741.32	26.29	RTK
31	477881.60	6206384.62	25.20	UYSJ
32	478065.86	6205964.22	30.56	UYSJ
33	477870.11	6205641.80	34.49	UYSJ
34	477568.88	6205363.12	43.83	UYSJ
35	477361.95	6205123.44	38.52	UYSJ
36	476831.09	6204503.96	36.60	UYSJ
37	-	-	-	-
38	476275.64	6203867.50	34.23	UYSJ
39	477000.38	6203892.76	38.23	UYSJ

40	476974.54	6204175.16	39.35	UYSJ
41	477160.22	6204161.58	40.24	UYSJ
42	477748.46	6204722.93	39.87	RTK
43	477959.13	6205087.87	37.98	RTK
44	477899.55	6205382.58	37.54	RTK
45	478292.57	6205680.06	38.27	RTK
46	478348.69	6205188.71	39.98	RTK
47	478390.34	6204805.23	42.07	RTK
48	478231.57	6204658.05	38.72	RTK
49	478401.23	6204354.38	47.44	RTK
50	478431.20	6204154.45	51.28	RTK
51	-	-	-	-
52	477636.23	6203903.61	35.58	RTK
53	-	-	-	-
54	478047.94	6203468.80	44.13	UYSJ
55	478060.46	6203049.24	53.08	RTK
56	478364.75	6202773.49	52.52	UYSJ
57	478500.96	6203018.16	53.72	UYSJ
58	478462.25	6203410.04	52.55	RTK
59	478440.06	6203736.81	54.22	RTK
60	478685.53	6203872.30	51.97	RTK
61	478726.00	6203573.16	45.43	RTK
62	478875.47	6203338.96	49.46	RTK
63	479091.65	6203574.00	44.22	RTK
64	479080.55	6204393.35	40.39	RTK
65	478757.94	6204496.77	56.05	RTK
66	478714.59	6204279.81	48.69	RTK

Tabla 4.1.3 - Posicionamiento de Campo en la Zona I, para el 2° Estudio.

Los puntos marcados en rojo (1, 22, 23, 24, 37, 51 y 53 en *Tabla 4.1.3*) no se logran observar con RTK ni Ntrip, resultando una muestra de 59 puntos para el análisis del segundo estudio.

2. ZONA II- Fraile Muerto

Se realizan ajustes según la experiencia en la Zona I, se conecta la base auxiliar aumentando la potencia de emisión de la radio-frecuencia teniendo en cuenta el área a cubrir. Aun así, hay puntos los cuales no se logran observar con esta metodología, muy pocos en comparación con los tomados en la Zona I. De igual forma estos puntos se toman con diferencial Ntrip.



Figura 4.1.7 - Puntos pertenecientes a la muestra en la Zona II.

Al igual que en la Zona I, se modifica la ubicación de algunos puntos por otros con mejor definición en campo, buscando siempre mantener una buena visualización del punto en las ortoimágenes de la IDEuy.



Figura 4.1.8 - Punto 48 modificado de la muestra en la Zona II.

Tabla de datos de campo

Las coordenadas planas (X,Y) se encuentran en el sistema de referencia SIRGAS-ROU98 UTM21S y en altimetría se utiliza las cotas ortométricas (H), modelo geoidal EGM2008.

Datos 2do Estudio				
Pto.	Este	Norte	H	OBS
1	732994,02	6399724,69	130,97	RTK
2	732581,91	6399649,89	129,21	RTK
3	732657,47	6399387,60	130,19	RTK
4	732703,61	6398971,29	125,75	RTK
5	-	-	-	-
6	-	-	-	-
7	733699,72	6398715,14	130,69	RTK
8	732906,93	6398617,58	126,98	RTK
9	733310,93	6398364,94	132,82	RTK
10	733886,60	6398094,07	137,52	RTK
11	-	-	-	-
12	-	-	-	-
13	734265,12	6399990,37	150,81	RTK
14	733745,27	6399997,34	154,60	RTK
15	733324,44	6400032,44	143,12	RTK
16	733062,56	6400352,62	146,59	RTK
17	733676,33	6400478,56	140,02	UYCL
18	-	-	-	-
19	-	-	-	-
20	733777,02	6401199,24	133,50	RTK
21	734199,16	6401353,44	147,01	RTK
22	734203,51	6401818,17	142,67	RTK
23	733986,07	6401841,32	140,14	RTK
24	733632,69	6402102,19	132,19	RTK
25	733211,64	6402089,12	131,20	RTK
26	732912,19	6401978,09	138,09	RTK
27	732561,94	6401705,47	144,63	RTK
28	733033,86	6401642,24	141,35	RTK
29	733391,21	6401535,08	133,73	RTK
30	732925,68	6401114,68	148,57	RTK
31	733270,16	6400868,78	142,79	RTK
32	732612,42	6400479,46	133,48	RTK
33	732687,06	6400819,61	140,59	RTK
34	732392,66	6401372,24	142,60	RTK

35	732144,12	6401717,78	137,87	RTK
36	732130,18	6401987,49	129,96	RTK
37	731585,40	6401756,27	126,27	RTK
38	731160,90	6401892,67	126,29	RTK
39	731333,43	6401649,74	124,00	RTK
40	731790,57	6401300,79	130,59	RTK
41	-	-	-	-
42	732047,75	6400773,08	126,73	UYCL
43	732038,53	6400349,12	125,67	RTK
44	-	-	-	-
45	731766,22	6399751,61	124,48	RTK
46	731286,93	6399691,42	124,71	RTK
47	731665,17	6399437,66	124,76	RTK
48	731442,60	6399085,37	133,81	RTK
49	731494,73	6398728,29	139,01	RTK
50	731494,46	6398280,24	144,95	RTK
51	731561,41	6397948,47	147,26	RTK
52	732571,30	6397869,74	132,55	RTK
53	732207,85	6398083,70	132,40	RTK
54	732433,49	6398230,19	132,55	RTK
55	-	-	-	-
56	-	-	-	-
57	732073,25	6399363,57	127,66	UYCL
58	732159,30	6399793,99	125,04	RTK
59	-	-	-	-
60	731986,10	6401383,10	131,28	RTK

Tabla 4.1.4 - Posicionamiento de Campo en la Zona II, para el 2º Estudio.

Los puntos marcados en rojo (5, 6, 11, 12, 18, 19, 41, 44, 55, 56 y 59 en *Tabla 4.1.4*), no se logran observar por encontrarse en zonas inaccesibles, por ejemplo los próximos a la zona del arroyo, al estar inundados al momento de realizar el levantamiento; como también, por no poder comunicarse con los dueños de la propiedad privada en la que se encuentran. De esta forma se obtiene una muestra total de campo de 49 puntos.

4.2 Procesamiento de los datos

4.2.1 Primer Estudio

1. ZONA I- Nueva Helvecia

Se procesan los datos obtenidos en campo, para ello se compara cada metodología con las observaciones Post Procesadas, de mayor precisión.

Se observan las desviaciones puntuales de los puntos relevados (ver *Tabla 4.2.1*) en sus componentes ($\Delta E, \Delta N$) y Δh , así como las desviaciones promedio respecto a cada metodología (ver *Tabla 4.2.2* y *Figura 4.2.1*).

Pto. 10						
Método de Med.	Este	ΔE	Norte	ΔN	Altura	Δh
PostProceso	479661.82	-	6206472.47	-	43.68	-
RTK Radio	479661.80	0.01	6206472.48	-0.01	43.67	0.01
Ntrip San José	479661.81	0.01	6206472.45	0.02	43.76	-0.08
Ntrip Colonia**	479661.72	0.10	6206472.42	0.06	43.74	-0.06
VRS	479661.79	0.03	6206472.46	0.02	43.73	-0.05

Pto. 30						
Método de Med.	Este	ΔE	Norte	ΔN	Altura	Δh
PostProceso	477616.19	-	6206741.31	-	42.35	-
RTK Radio	477616.18	0.00	6206741.32	0.00	42.39	-0.05
Ntrip San José	477616.22	-0.03	6206741.29	0.02	42.42	-0.07
Ntrip Colonia**	477616.17	0.02	6206741.31	0.01	42.53	-0.19
VRS	477616.17	0.02	6206741.34	-0.02	42.49	-0.15

Pto. 37						
Método de Med.	Este	ΔE	Norte	ΔN	Altura	Δh
PostProceso	476548.46	-	6204196.53	-	49.28	-
RTK Radio	-	-	-	-	-	-
Ntrip San José	476548.57	-0.10	6204196.56	-0.03	49.42	-0.14
Ntrip Colonia	476548.40	0.07	6204196.51	0.02	49.35	-0.06
VRS	476548.48	-0.01	6204196.50	0.03	49.35	-0.07

Pto. 52						
Método de Med.	Este	ΔE	Norte	ΔN	Altura	Δh
PostProceso	477636.23	-	6203903.60	-	51.66	-
RTK Radio	477636.23	0.00	6203903.61	-0.01	51.66	0.00
Ntrip San José	477636.27	-0.04	6203903.62	-0.02	51.74	-0.08
Ntrip Colonia**	477636.24	0.00	6203903.66	-0.06	51.71	-0.05
VRS	-	-	-	-	-	-

Pto. 55						
Método de Med.	Este	ΔE	Norte	ΔN	Altura	Δh
PostProceso	478060.47	-	6203049.25	-	69.14	-
RTK Radio	478060.455	0.01	6203049.24	0.02	69.15	-0.01
Ntrip San José	478060.49	-0.02	6203049.27	-0.01	69.24	-0.10
Ntrip Colonia	478060.44	0.02	6203049.28	-0.03	69.19	-0.05
VRS	478060.47	0.00	6203049.23	0.03	69.16	-0.02

Pto. 71						
Método de Med.	Este	ΔE	Norte	ΔN	Altura	Δh
PostProceso	478455.75	-	6203738.31	-	70.38	-
RTK Radio	478455.75	0.00	6203738.31	0.00	70.37	0.01
Ntrip San José	478455.82	-0.07	6203738.29	0.02	70.40	-0.01
Ntrip Colonia**	478455.81	-0.06	6203738.46	-0.15	70.39	-0.01
VRS	478455.76	-0.01	6203738.31	-0.01	70.44	-0.06

Pto. 73						
Método de Med.	Este	ΔE	Norte	ΔN	Altura	Δh
PostProceso	478953.90	-	6206144.40	-	56.21	-
RTK Radio	478953.89	0.01	6206144.39	0.00	56.19	0.02
Ntrip San José	478953.91	-0.01	6206144.38	0.01	56.29	-0.07
Ntrip Colonia**	478953.89	0.01	6206144.36	0.03	56.30	-0.08
VRS	478953.90	0.00	6206144.38	0.01	56.27	-0.06

Pto. 75						
Método de Med.	Este	ΔE	Norte	ΔN	Altura	Δh
PostProceso	478566.48	-	6206702.15	-	59.52	-
RTK Radio	-	-	-	-	-	-
Ntrip San José	478566.50	-0.02	6206702.14	0.01	59.68	-0.16
Ntrip Colonia**	478566.36	0.12	6206702.06	0.09	59.38	0.14
VRS	478566.48	0.00	6206702.14	0.01	59.58	-0.06

Tabla 4.2.1 - Diferenciales parciales de las observaciones para la Zona I.
(**medido como punto flotante)

Promedio desviaciones					
Método de Med.	n	ΔE	ΔN	Δd	Δh
PostProceso	-	-	-	-	-
RTK Radio	6	0.01	0.01	0.01	0.02
Ntrip San José	8	0.04	0.02	0.04	0.09
Ntrip Colonia**	8	0.05	0.06	0.08	0.08
VRS	7	0.01	0.02	0.02	0.07

Tabla 4.2.2 - Promedio de desviaciones para la Zona I.
(**medido como punto flotante)

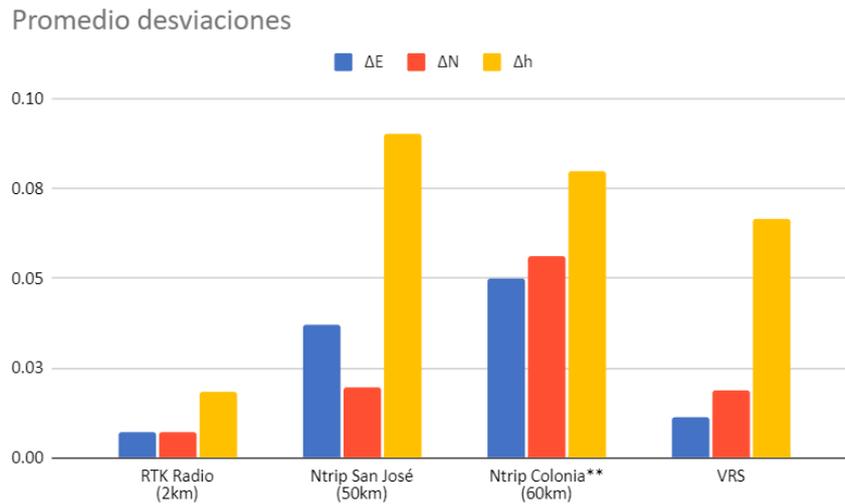


Figura 4.2.1 - Gráfica de barra promedio de desviaciones para la Zona I.

2. ZONA II- Fraile Muerto

Se procesan los datos obtenidos en campo, comparando cada metodología con las observaciones Post Procesadas de mayor precisión.

Se observan las desviaciones puntuales de los puntos relevados (ver *Tabla 4.2.3*) en sus componentes ($\Delta E, \Delta N$) y Δh , y las desviaciones promedio respecto a cada metodología (ver *Tabla 4.2.4* y *Figura 4.2.2*).

Pto. 07						
Método de Med.	Este	ΔE	Norte	ΔN	Altura	Δh
PostProceso	733699,71	-	6398715,14	-	144,74	-
RTK Radio	733699,72	-0,01	6398715,14	0,00	144,73	0,01
Ntrip Cerro Largo	733699,69	0,02	6398715,13	0,01	144,78	-0,05
Ntrip Treinta y Tres	733699,71	0,00	6398715,09	0,05	145,00	-0,27
VRS	733699,70	0,01	6398715,13	0,01	144,79	-0,05

Pto. 13						
Método de Med.	Este	ΔE	Norte	ΔN	Altura	Δh
PostProceso	734265,15	-	6399990,37	-	164,82	-
RTK Radio	734265,14	0,01	6399990,37	0,00	164,83	-0,01
Ntrip Cerro Largo	734265,14	0,00	6399990,38	-0,01	164,83	0,00
Ntrip Treinta y Tres**	734265,14	0,01	6399990,33	0,04	164,78	0,04
VRS	734265,13	0,01	6399990,37	0,00	164,84	-0,01

Pto. 17						
Método de Med.	Este	ΔE	Norte	ΔN	Altura	Δh
PostProceso	733676,32	-	6400478,54	-	154,08	-
RTK Radio	-	-	-	-	-	-
Ntrip Cerro Largo	733676,33	-0,01	6400478,55	-0,01	154,08	0,00
Ntrip Treinta y Tres	733676,28	0,04	6400478,55	-0,01	154,10	-0,02
VRS	733676,31	0,01	6400478,55	-0,01	154,08	0,00

Pto. 27						
Método de Med.	Este	ΔE	Norte	ΔN	Altura	Δh
PostProceso	732561,97	-	6401705,48	-	158,63	-
RTK Radio	732561,96	0,01	6401705,47	0,01	158,66	-0,03
Ntrip Cerro Largo	732561,96	0,01	6401705,49	-0,01	158,54	0,09
Ntrip Treinta y Tres	-	-	-	-	-	-
VRS	732561,95	0,02	6401705,47	0,01	158,63	0,00

Pto. 32						
Método de Med.	Este	ΔE	Norte	ΔN	Altura	Δh
PostProceso	732612,42	-	6400479,42	-	147,54	-
RTK Radio	732612,42	0,00	6400479,43	-0,01	147,52	0,02
Ntrip Cerro Largo	732612,41	0,01	6400479,41	0,01	147,50	0,03
Ntrip Treinta y Tres**	732612,48	-0,06	6400479,44	-0,03	147,54	0,00
VRS	732612,40	0,02	6400479,41	0,01	147,52	0,02

Pto. 33						
Método de Med.	Este	ΔE	Norte	ΔN	Altura	Δh
PostProceso	732047,74	-	6400773,07	-	140,86	-
RTK Radio	-	-	-	-	-	-
Ntrip Cerro Largo	732047,74	0,00	6400773,07	0,00	140,81	0,05
Ntrip Treinta y Tres**	732047,74	0,00	6400773,14	-0,07	141,01	-0,15
VRS	732047,73	0,01	6400773,06	0,01	140,84	0,01

Pto. 48						
Método de Med.	Este	ΔE	Norte	ΔN	Altura	Δh
PostProceso	731442,62	-	6399085,36	-	147,88	-
RTK Radio	731442,60	0,02	6399085,37	-0,01	147,88	0,00
Ntrip Cerro Largo	731442,61	0,01	6399085,38	-0,02	147,86	0,02
Ntrip Treinta y Tres	-	-	-	-	-	-
VRS	731442,62	0,00	6399085,34	0,02	147,94	-0,06

Pto. 54						
Método de Med.	Este	ΔE	Norte	ΔN	Altura	Δh
PostProceso	732433,50	-	6398230,22	-	146,53	-
RTK Radio	732433,49	0,01	6398230,20	0,02	146,55	-0,01
Ntrip Cerro Largo	732433,48	0,02	6398230,16	0,06	146,59	-0,05
Ntrip Treinta y Tres	-	-	-	-	-	-
VRS	732433,48	0,02	6398230,18	0,04	146,59	-0,06

Pto. 57						
Método de Med.	Este	ΔE	Norte	ΔN	Altura	Δh
PostProceso	732073,26	-	6399363,57	-	141,73	-
RTK Radio	-	-	-	-	-	-
Ntrip Cerro Largo	732073,25	0,01	6399363,56	0,01	141,75	-0,02
Ntrip Treinta y Tres	732073,25	0,01	6399363,56	0,01	141,81	-0,08
VRS	732073,25	0,01	6399363,55	0,02	141,77	-0,05

Tabla 4.2.3 - Diferenciales parciales de las observaciones para la Zona II.
(**medido como punto flotante)

Promedio desviaciones					
Método de Med.	n	ΔE	ΔN	Δd	Δh
PostProceso	-	-	-	-	-
RTK Radio	6	0,01	0,01	0,01	0,01
Ntrip Cerro Largo	9	0,01	0,02	0,02	0,04
Ntrip Treinta y Tres**	6	0,02	0,03	0,04	0,09
VRS	9	0,01	0,01	0,02	0,03

Tabla 4.2.4 - Promedio de desviaciones para la Zona II.
(**medido como punto flotante)

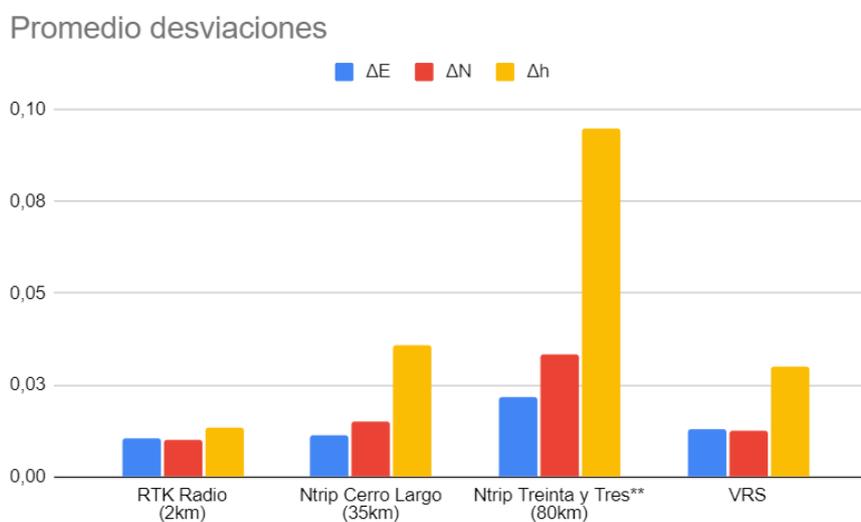


Figura 4.2.2 - Gráfica de barra promedio de desviaciones para la Zona II.

4.2.2 Segundo Estudio

1. ZONA I- Nueva Helvecia

Se procede a realizar el análisis estadístico de los 59 puntos homólogos de la muestra de campo y los modelos de la IDEuy (ortomosaico y MDT).

Pto.	Datos Campo			Datos QGIS		
	Este	Norte	H	Este	Norte	H
2	479065.20	6204799.58	47.55	479065.19	6204799.56	47.61
3	478897.63	6205083.35	41.02	478897.64	6205083.31	41.09
4	478628.29	6205190.38	45.93	478628.49	6205190.28	46.03
5	479205.10	6205479.55	38.61	479205.16	6205479.59	38.90
6	479420.35	6205726.26	39.92	479420.38	6205726.32	40.25
7	479654.10	6206001.62	30.40	479654.15	6206001.61	30.49
8	480065.45	6206480.84	25.52	480065.42	6206480.82	25.68
9	479679.28	6206821.88	25.25	479679.27	6206821.89	25.26
10	479661.80	6206472.48	27.57	479661.92	6206472.59	27.76
11	479279.60	6206173.95	30.03	479279.68	6206173.91	30.13
12	478955.66	6206146.48	39.90	478955.77	6206146.46	40.04
13	479017.95	6205864.01	32.83	479017.97	6205863.99	32.94
14	478919.34	6205657.23	43.65	478919.42	6205657.19	43.83
15	478567.83	6205519.06	45.64	478567.82	6205519.07	46.03
16	478628.19	6205921.18	43.02	478628.29	6205921.12	43.21
17	478527.16	6206220.42	42.71	478527.31	6206220.42	42.90
18	478710.93	6206519.34	36.86	478711.02	6206519.27	36.92
19	479143.13	6206631.82	31.54	479143.17	6206631.74	31.64
20	478993.86	6206923.04	34.28	478993.97	6206922.93	34.38
21	479223.85	6207128.11	26.18	479223.96	6207128.10	26.27
25	478951.50	6207337.52	31.29	478951.76	6207337.54	31.31
26	478645.27	6207305.86	23.03	478645.42	6207305.88	23.05
27	478346.20	6207113.75	27.86	478346.34	6207113.69	27.84
28	478399.62	6206691.47	36.08	478399.71	6206691.40	36.09
29	478069.06	6206727.93	24.79	478069.02	6206727.88	24.90
30	477616.18	6206741.32	26.29	477616.35	6206741.27	26.21
31	477881.60	6206384.62	25.20	477881.70	6206384.68	25.27
32	478065.86	6205964.22	30.56	478065.58	6205964.20	30.57
33	477870.11	6205641.80	34.49	477870.22	6205641.90	34.57
34	477568.88	6205363.12	43.83	477569.05	6205363.08	44.17
35	477361.95	6205123.44	38.52	477362.00	6205123.42	38.54
36	476831.09	6204503.96	36.60	476831.97	6204503.12	36.80
38	476275.64	6203867.50	34.23	476275.86	6203867.38	34.42
39	477000.38	6203892.76	38.23	477000.20	6203892.70	38.47
40	476974.54	6204175.16	39.35	476974.65	6204175.10	39.59
41	477160.22	6204161.58	40.24	477160.24	6204161.56	40.50
42	477748.46	6204722.93	39.87	477748.60	6204723.01	40.07
43	477959.13	6205087.87	37.98	477959.29	6205087.81	38.17

44	477899.55	6205382.58	37.54	477899.71	6205382.49	37.63
45	478292.57	6205680.06	38.27	478292.69	6205680.08	38.41
46	478348.69	6205188.71	39.98	478348.82	6205188.60	40.12
47	478390.34	6204805.23	42.07	478390.44	6204805.10	42.20
48	478231.57	6204658.05	38.72	478231.65	6204658.04	38.88
49	478401.23	6204354.38	47.44	478401.32	6204354.33	47.54
50	478431.20	6204154.45	51.28	478431.17	6204154.42	51.28
52	477636.23	6203903.61	35.58	477636.36	6203903.50	35.71
54	478047.94	6203468.80	44.13	478047.93	6203468.67	44.05
55	478060.46	6203049.24	53.08	478060.48	6203049.20	53.24
56	478364.75	6202773.49	52.52	478364.83	6202773.38	52.48
57	478500.96	6203018.16	53.72	478500.88	6203018.13	53.76
58	478462.25	6203410.04	52.55	478462.34	6203409.97	52.66
59	478440.06	6203736.81	54.22	478440.09	6203736.86	54.27
60	478685.53	6203872.30	51.97	478685.53	6203872.15	52.05
61	478726.00	6203573.16	45.43	478726.08	6203573.12	45.41
62	478875.47	6203338.96	49.46	478875.55	6203339.02	49.60
63	479091.65	6203574.00	44.22	479091.82	6203574.00	44.27
64	479080.55	6204393.35	40.39	479080.64	6204393.25	40.43
65	478757.94	6204496.77	56.05	478757.94	6204496.67	56.16
66	478714.59	6204279.81	48.69	478714.55	6204279.74	48.82

Tabla 4.2.5 - Posicionamiento de los puntos para el 2do. Estudio. Zona I.

El punto 36 (resaltado en *Tabla 4.2.5*) se elimina al presentar un error no tolerable, posiblemente debido a una modificación en el elemento relevado no identificada en campo.

Depuración, criterio de Chauvenet

Pto.	\u0394E	\u0394N	\u0394H
2	0.02	0.03	0.06
3	0.01	0.04	0.07
4	0.20	0.10	0.10
5	0.06	0.04	0.29
6	0.02	0.06	0.33
7	0.05	0.01	0.09
8	0.03	0.02	0.16
9	0.01	0.01	0.01
10	0.11	0.10	0.19
11	0.08	0.04	0.10
12	0.10	0.02	0.14
13	0.02	0.02	0.11
14	0.08	0.04	0.18
15	0.01	0.01	0.39
16	0.10	0.06	0.19
17	0.15	0.00	0.19
18	0.09	0.06	0.06
19	0.04	0.08	0.10
20	0.11	0.11	0.10
21	0.11	0.01	0.09
25	0.25	0.02	0.02
26	0.15	0.02	0.02
27	0.14	0.06	0.02
28	0.09	0.08	0.01
29	0.04	0.04	0.11
30	0.17	0.05	0.08
31	0.10	0.06	0.07
32	0.27	0.02	0.01
33	0.11	0.10	0.08
34	0.17	0.04	0.34
35	0.05	0.02	0.02
38	0.22	0.12	0.19
39	0.19	0.06	0.24
40	0.11	0.06	0.24
41	0.03	0.02	0.26
42	0.14	0.08	0.20
43	0.16	0.06	0.19
44	0.15	0.09	0.09
45	0.11	0.02	0.14
46	0.12	0.11	0.14
47	0.11	0.13	0.13
48	0.08	0.01	0.16
49	0.09	0.05	0.10
50	0.03	0.02	0.00
52	0.13	0.11	0.13
54	0.01	0.13	0.08
55	0.03	0.04	0.16
56	0.07	0.11	0.04
57	0.08	0.03	0.04
58	0.08	0.07	0.11
59	0.03	0.05	0.05
60	0.00	0.16	0.08
61	0.08	0.04	0.02
62	0.07	0.05	0.14
63	0.17	0.00	0.05
64	0.09	0.10	0.04
65	0.01	0.10	0.11
66	0.04	0.07	0.13

Tabla 4.2.6 - Desviaciones de los puntos de la muestra, Zona I.

- o En ($\Delta E, \Delta N$):

Al aplicar el algoritmo y calcular el intervalo $[\bar{V} \pm k\sigma]$, se observa que hay que eliminar 4 observables (puntos 25, 32, 38 y 60, *Tabla 4.2.6*), reduciendo la muestra a un total de 54 puntos. Se elimina el punto cuando una de las componentes ($\Delta E, \Delta N$) est\u00e1 fuera de tolerancia, esta recomendaci\u00f3n se justifica al trabajar las dos componentes juntas, como error de planimetr\u00eda.

Se expresan los \u00faltimos intervalos calculados para la depuraci\u00f3n, habiendo iterado cada vez que un punto es eliminado de la muestra.

Dados: $\bar{V}_{\Delta E} = 0.09m$, $k = 2.59$ y $\sigma_{\Delta E} = 0.05m \Rightarrow 0 \leq |\Delta E| \leq 0.22$

Dados: $\bar{V}_{\Delta N} = 0.05m$, $k = 2.59$ y $\sigma_{\Delta N} = 0.03m \Rightarrow 0 \leq |\Delta N| \leq 0.14$

- En ΔH :

Se aplica el mismo algoritmo que para $(\Delta E, \Delta N)$. En este caso se eliminan 7 observables (puntos 5, 6, 15, 34, 39, 40 y 31, *Tabla 4.2.6*), resultando en una muestra final de 51 puntos.

Se expresa el último intervalo calculado de la muestra:

$$\text{Datos: } \bar{V}_{\Delta H} = 0.10m, k = 2.57 \text{ y } \sigma_{\Delta H} = 0.06m \Rightarrow 0 \leq |\Delta H| \leq 0.24$$

Correlación de Pearson para las variables $(\Delta E, \Delta N)$

Para el cálculo de la correlación de Pearson se utiliza el programa Minitab:

$$\rho_{(\Delta E, \Delta N)} = 0.17$$

Con este resultado, no es posible descartar una correlación entre variables, sin embargo, si existe, tiene una correlación débil.

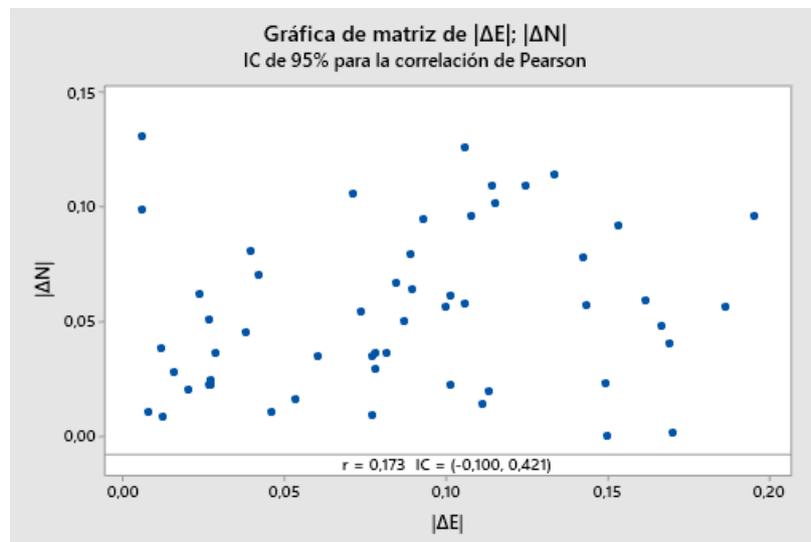


Figura 4.2.3 - Correlación de Pearson, Zona I.

Test de normalidad, Kolmogorov-Smirnov

- En ΔE :

Para realizar el test de Normalidad se utiliza en programa Minitab:

$$\rho_{valor} = 0.15.$$

Se verifica que la coordenada ΔE sigue una distribución Normal ($\rho_{valor} > \alpha = 0.05$).

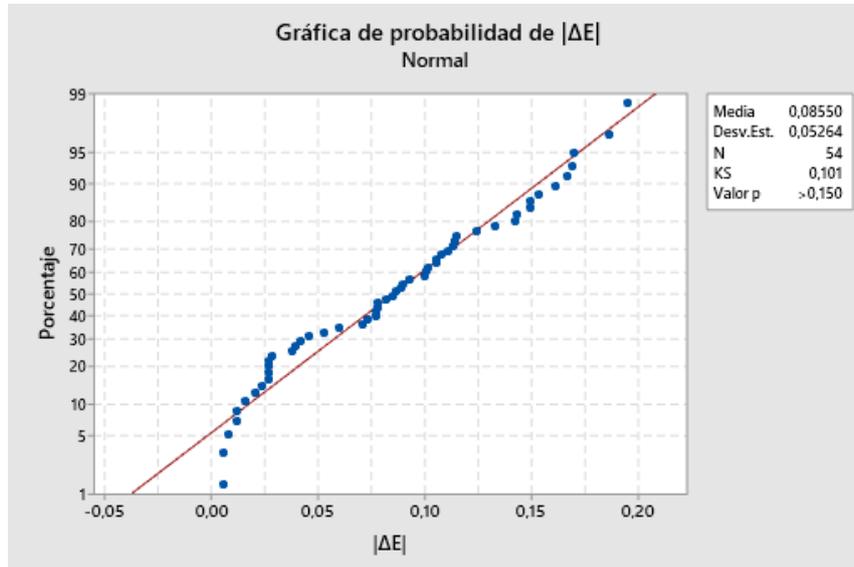


Figura 4.2.4 - Test de Normalidad para la variable ΔE , Zona I.

La máxima distancia entre distribución Normal teórica y observada, para este caso $KS = 0.10$, no supera el máximo establecido en la tabla tabulada para valores críticos al $\alpha = 0.05$, $D_{MAX} = 0.19$. Por tanto, se acepta la Hipótesis nula, la coordenada ΔE sigue una distribución Normal.

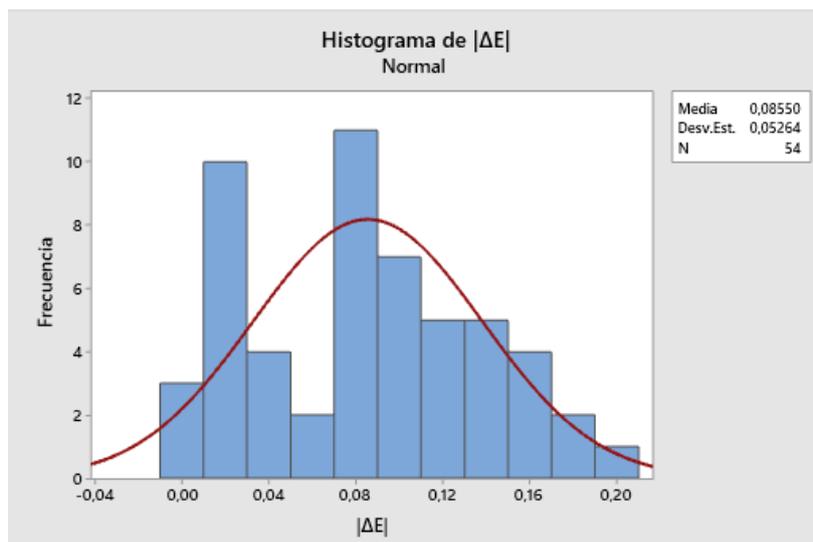


Figura 4.2.5 - Histograma para la variable ΔE y Normal ajustada, Zona I.

- En ΔN :

Con el software Minitab, se obtiene:

$$\rho_{valor} = 0.15$$

Se verifica que la coordenada ΔN sigue una distribución Normal ($\rho_{valor} > \alpha = 0.05$).

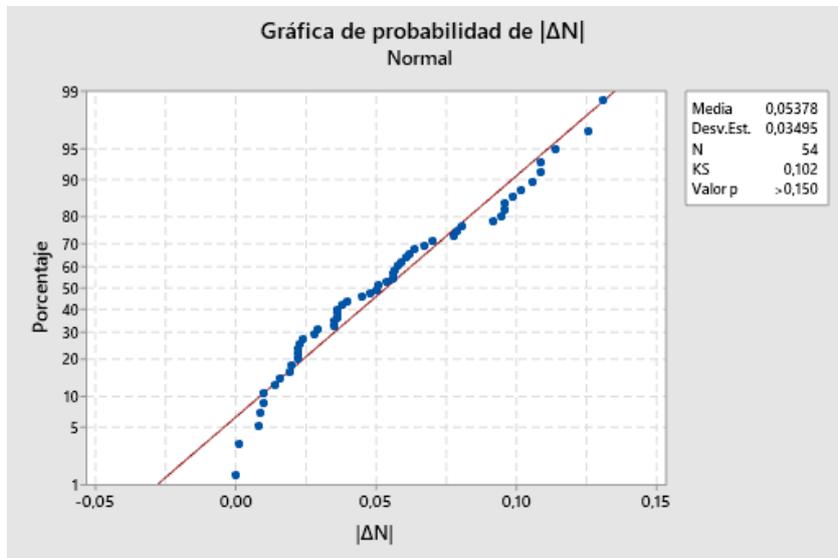


Figura 4.2.6 - Test de Normalidad para la variable ΔN , Zona I.

Al igual que para la componente ΔE , $KS = 0.10$, menor al máximo $D_{MAX} = 0.19$. Aceptando la Hipótesis nula, la coordenada ΔN también sigue una distribución Normal.

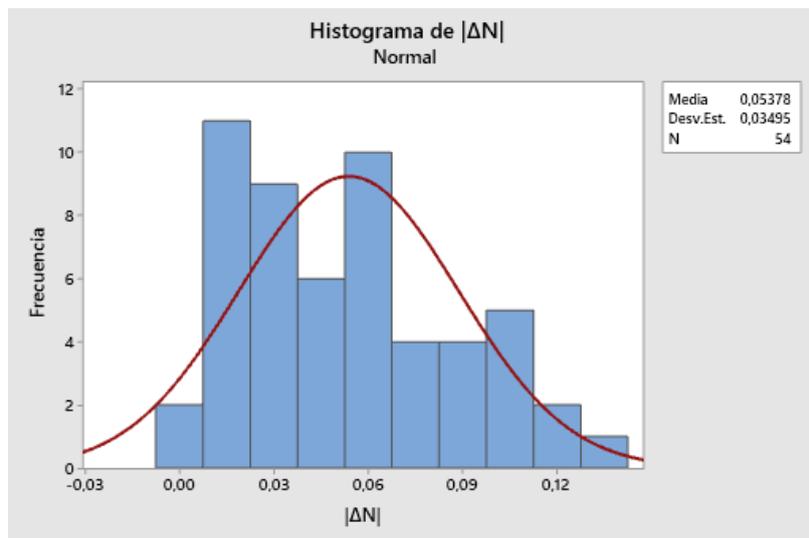


Figura 4.2.7 - Histograma para la variable ΔN y Normal ajustada, Zona I.

- En ΔH :

Con el software Minitab se obtiene:

$$p_{valor} = 0.15$$

Se verifica que la coordenada ΔH sigue una distribución Normal ($p_{valor} > \alpha = 0.05$).

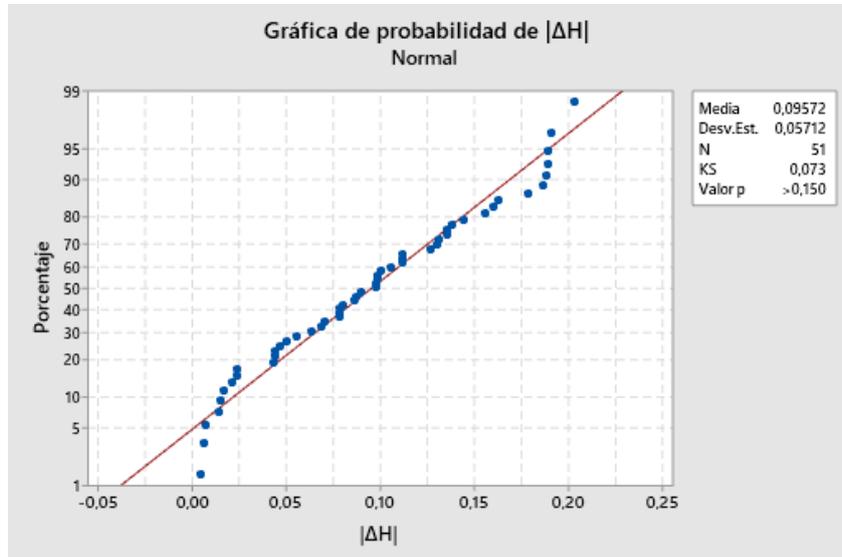


Figura 4.2.8 - Test de Normalidad para la variable ΔH , Zona I.

Para este caso, con un $KS = 0.07$, nuevamente menor al $D_{MAX} = 0.19$. Por lo que se acepta la Hipótesis nula, ΔH sigue una distribución Normal.

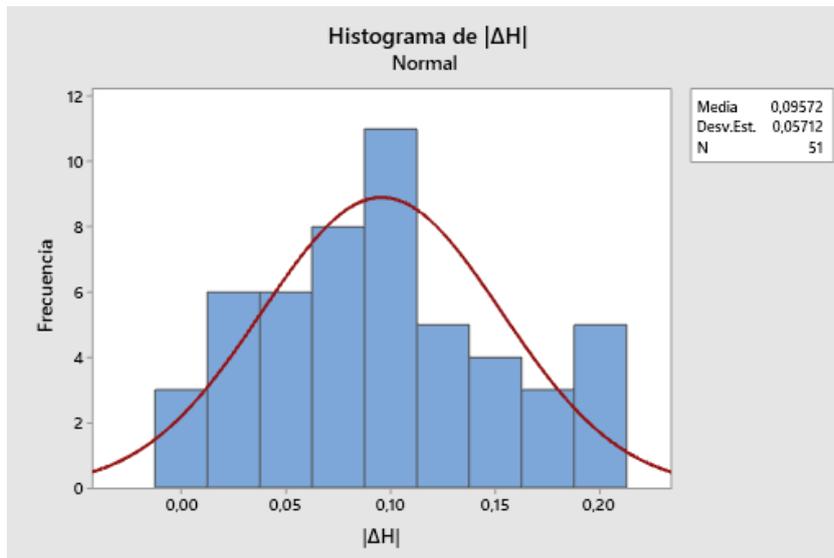


Figura 4.2.9 - Histograma para la variable ΔH y Normal ajustada, Zona I.

Intervalo de confianza al 95%

Se procede a calcular los intervalos de confianza determinados en el apartado 2.4.3 :

$I\alpha (v)_1$ - que una nueva observación permanezca a la muestra.

$I\alpha (v)_2$ - que el verdadero valor de la media pertenezca a esta.

- En ΔE :

$$\text{Datos: } \bar{V}_{\Delta E} = 0.09m, n = 54 \text{ y } s_{\Delta E} = 0.05m \Rightarrow \begin{cases} I\alpha (v_{\Delta E})_1 = [0.00m, 0.19m] \\ I\alpha (v_{\Delta E})_2 = [0.07m, 0.10m] \end{cases}$$

Al 95% de confianza se determina que:

El valor más probable de ΔE es $\bar{V}_{\Delta E} = 0.09m$.

Dada una nueva observación de ΔE , pertenece al intervalo: $0 \leq |\Delta E| \leq 0.19$.

El verdadero valor de ΔE pertenece al intervalo: $0.07 \leq |\Delta E| \leq 0.10$.

- En ΔN :

$$\text{Datos: } \bar{V}_{\Delta N} = 0.05m, n = 54 \text{ y } s_{\Delta N} = 0.03m \Rightarrow \begin{cases} I\alpha (v_{\Delta N})_1 = [0.00m, 0.12m] \\ I\alpha (v_{\Delta N})_2 = [0.04m, 0.06m] \end{cases}$$

Al 95% de confianza se determina que:

El valor más probable de ΔN es $\bar{V}_{\Delta N} = 0.05m$.

Dada una nueva observación de ΔN , pertenece al intervalo $0 \leq |\Delta N| \leq 0.12$.

El verdadero valor de ΔN pertenece al intervalo $0.04 \leq |\Delta N| \leq 0.06$.

- En Δr :

Se define la variable planimétrica $\Delta r^2 = \Delta E^2 + \Delta N^2$.

$$\text{Datos: } \bar{V}_{\Delta r} = 0.11m, n = 54 \text{ y } s_{\Delta r} = 0.05m \Rightarrow \begin{cases} I\alpha (v_{\Delta r})_1 = [0.01m, 0.21m] \\ I\alpha (v_{\Delta r})_2 = [0.09m, 0.12m] \end{cases}$$

Al 95% de confianza se determina que:

El valor más probable de Δr es $\bar{V}_{\Delta r} = 0.11m$.

Dada una nueva observación de Δr , pertenece al intervalo $0.01 \leq |\Delta r| \leq 0.21$.

El verdadero valor de Δr pertenece al intervalo $0.09 \leq |\Delta r| \leq 0.12$.

- En ΔH :

$$\text{Datos: } \bar{V}_{\Delta H} = 0.10m, n = 51 \text{ y } s_{\Delta H} = 0.06m \Rightarrow \begin{cases} I\alpha (v_{\Delta H})_1 = [0.00m, 0.21m] \\ I\alpha (v_{\Delta H})_2 = [0.08m, 0.11m] \end{cases}$$

Al 95% de confianza se determina que:

El valor más probable de ΔH es $\bar{V}_{\Delta H} = 0.10m$.

Dada una nueva observación de ΔH pertenece al intervalo $0 \leq |\Delta H| \leq 0.21$.

El verdadero valor de ΔH pertenece al intervalo $0.08 \leq |\Delta H| \leq 0.11$.

Cálculo del estadístico NSSDA

- En $(\Delta E, \Delta N)$:

$$\text{Datos: } RMSE_{\Delta E} = 0.10m \text{ y } RMSE_{\Delta N} = 0.06m \Rightarrow \begin{cases} RMSE_{\Delta r} = 0.12m \\ NSSDA_{\Delta r} = 0.20m \end{cases}$$

Comprobando al 95% de confianza una exactitud planimétrica de 0.20m.

- En (ΔH) :

$$\text{Dado: } RMSE_{\Delta H} = 0.11m \Rightarrow NSSDA_{\Delta H} = 0.22m$$

Comprobando al 95% de confianza una exactitud altimétrica de 0,22 m.

2. ZONA II- Fraile Muerto

Se procede a realizar el análisis estadístico de los 49 puntos homólogos de la muestra de campo y los modelos de la IDEuy (ortomosaico y MDT).

Pto.	Datos Campo			Datos QGIS		
	Este	Norte	H	Este	Norte	H
1	732994,02	6399724,69	130,97	732994,34	6399724,33	131,36
2	732581,91	6399649,89	129,21	732581,88	6399649,80	129,64
3	732657,47	6399387,60	130,19	732657,50	6399387,58	130,49
4	732703,61	6398971,29	125,75	732704,01	6398971,22	125,76
7	733699,72	6398715,14	130,69	733700,01	6398715,65	130,98
8	732906,93	6398617,58	126,98	732906,50	6398617,91	127,55
9	733310,93	6398364,94	132,82	733311,02	6398364,95	132,73

10	733886,60	6398094,07	137,52	733886,43	6398094,40	137,57
13	734265,12	6399990,37	150,81	734265,25	6399990,30	150,71
14	733745,27	6399997,34	154,60	733745,07	6399997,29	153,96
15	733324,44	6400032,44	143,12	733324,76	6400032,37	142,65
16	733062,56	6400352,62	146,59	733062,62	6400352,46	146,35
17	733676,33	6400478,56	140,02	733676,69	6400478,84	140,20
20	733777,02	6401199,24	133,50	733776,93	6401199,46	133,38
21	734199,16	6401353,44	147,01	734199,32	6401353,67	147,10
22	734203,51	6401818,17	142,67	734203,81	6401818,29	142,40
23	733986,07	6401841,32	140,14	733986,15	6401841,79	139,88
24	733632,69	6402102,19	132,19	733632,76	6402102,15	132,32
25	733211,64	6402089,12	131,20	733211,75	6402089,09	131,29
26	732912,19	6401978,09	138,09	732912,24	6401977,85	137,83
27	732561,94	6401705,47	144,63	732561,59	6401705,60	144,98
28	733033,86	6401642,24	141,35	733034,46	6401642,40	141,13
29	733391,21	6401535,08	133,73	733391,36	6401535,26	133,51
30	732925,68	6401114,68	148,57	732925,61	6401114,81	148,56
31	733270,16	6400868,78	142,79	733270,34	6400868,91	142,90
32	732612,42	6400479,46	133,48	732612,33	6400479,41	133,68
33	732687,06	6400819,61	140,59	732686,86	6400819,37	140,68
34	732392,66	6401372,24	142,60	732392,67	6401372,11	142,30
35	732144,12	6401717,78	137,87	732144,31	6401717,75	137,88
36	732130,18	6401987,49	129,96	732130,26	6401987,59	130,38
37	731585,40	6401756,27	126,27	731585,00	6401756,73	126,06
38	731160,90	6401892,67	126,29	731160,66	6401892,90	126,82
39	731333,43	6401649,74	124,00	731333,28	6401649,43	124,01
40	731790,57	6401300,79	130,59	731790,71	6401300,47	130,30
42	732047,75	6400773,08	126,73	732047,92	6400773,12	127,29
43	732038,53	6400349,12	125,67	732038,18	6400349,11	125,46
45	731766,22	6399751,61	124,48	731766,55	6399751,55	124,63
46	731286,93	6399691,42	124,71	731287,49	6399691,51	124,59
47	731665,17	6399437,66	124,76	731664,85	6399437,30	124,66
48	731442,60	6399085,37	133,81	731443,05	6399085,46	134,37
49	731494,73	6398728,29	139,01	731494,61	6398728,59	139,42
50	731494,46	6398280,24	144,95	731494,25	6398280,66	144,40
51	731561,41	6397948,47	147,26	731561,06	6397948,71	147,02
52	732571,30	6397869,74	132,55	732570,92	6397869,81	132,64
53	732207,85	6398083,70	132,40	732207,24	6398083,80	132,50
54	732433,49	6398230,19	132,55	732432,96	6398230,47	132,49
57	732073,25	6399363,57	127,66	732073,28	6399363,53	128,14
58	732159,30	6399793,99	125,04	732159,49	6399793,64	124,69
60	731986,10	6401383,10	131,28	731986,09	6401383,31	131,07

Tabla 4.2.7 - Posicionamiento de los puntos para el 2do. Estudio. Zona II.

Depuración, criterio de Chauvenet

Pto.	\Delta E	\Delta N	\Delta H	Pto.	\Delta E	\Delta N	\Delta H
1	0,32	0,36	0,39	32	0,08	0,05	0,20
2	0,03	0,09	0,43	33	0,20	0,24	0,08
3	0,03	0,03	0,29	34	0,01	0,13	0,30
4	0,40	0,07	0,01	35	0,20	0,03	0,02
7	0,28	0,52	0,29	36	0,07	0,10	0,41
8	0,43	0,32	0,56	37	0,39	0,46	0,21
9	0,09	0,01	0,09	38	0,24	0,23	0,54
10	0,17	0,34	0,04	39	0,15	0,31	0,02
13	0,12	0,06	0,10	40	0,14	0,32	0,29
14	0,20	0,05	0,63	42	0,17	0,05	0,57
15	0,32	0,07	0,47	43	0,35	0,02	0,20
16	0,06	0,17	0,23	45	0,33	0,06	0,15
17	0,36	0,28	0,17	46	0,56	0,09	0,12
20	0,09	0,22	0,11	47	0,31	0,36	0,11
21	0,16	0,23	0,09	48	0,44	0,09	0,56
22	0,30	0,12	0,28	49	0,13	0,31	0,41
23	0,07	0,47	0,26	50	0,21	0,42	0,56
24	0,06	0,04	0,14	51	0,35	0,24	0,24
25	0,10	0,03	0,08	52	0,38	0,07	0,08
26	0,05	0,23	0,26	53	0,61	0,09	0,10
27	0,35	0,13	0,34	54	0,53	0,27	0,06
28	0,60	0,16	0,22	57	0,03	0,04	0,48
29	0,15	0,18	0,22	58	0,19	0,35	0,35
30	0,07	0,13	0,01	60	0,01	0,21	0,21
31	0,18	0,13	0,11	-	-	-	-

Tabla 4.2.8 - Desviaciones de los puntos de la muestra, Zona II.

- En $(\Delta E, \Delta N)$:

Al aplicar el algoritmo y calcular el intervalo $[\bar{V} \pm k\sigma]$, no se elimina ningún observable, resultando intacta la muestra de 49 puntos. Se expresan los intervalos calculados para la depuración:

$$\text{Datos: } \bar{V}_{\Delta E} = 0.23m, k = 2.57 \text{ y } \sigma_{\Delta E} = 0.16m \Rightarrow 0 \leq |\Delta E| \leq 0.64$$

$$\text{Datos: } \bar{V}_{\Delta N} = 0.18m, k = 2.57 \text{ y } \sigma_{\Delta N} = 0.14m \Rightarrow 0 \leq |\Delta N| \leq 0.53$$

- En ΔH :

Se aplica el mismo algoritmo que para $(\Delta E, \Delta N)$. Al igual que en el caso anterior no se elimina ninguna observable, por lo que no se modifica la muestra.

Se expresa el intervalo de la muestra calculado:

$$\text{Datos: } \bar{V}_{\Delta H} = 0.25m, k = 2.57 \text{ y } \sigma_{\Delta H} = 0.06m \Rightarrow 0 \leq |\Delta H| \leq 0.69$$

Correlación de Pearson para las variables (ΔE , ΔN)

Al igual que para la Zona I, se utiliza el programa Minitab para el cálculo de la correlación:

$$\rho_{\Delta E, \Delta N} = 0.07$$

Se aprecia una dispersión total de los datos, descartando la existencia de correlación entre variables.

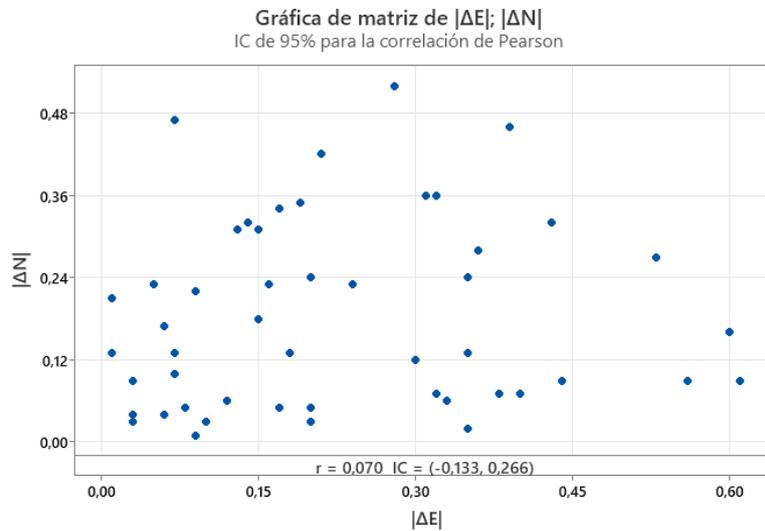


Figura 4.2.10 - Correlación de Pearson, Zona II.

Test de normalidad, Kolmogorov-Smirnov

- En ΔE :

En este caso, se obtiene para el test de Normalidad:

$$\rho_{valor} = 0.03$$

Indicando que los datos no siguen una distribución Normal ($\rho_{valor} < \alpha = 0.05$).

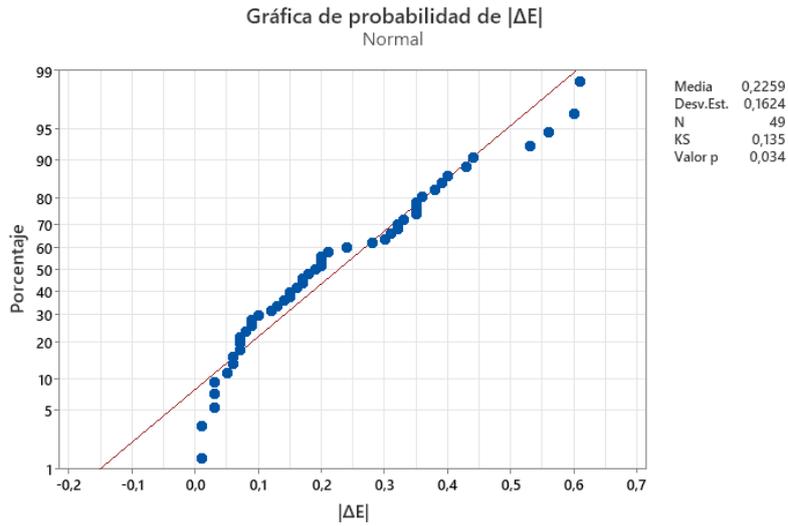


Figura 4.2.11 - Test de Normalidad para la variable ΔE , Zona II.

Sin embargo, para este caso la variable $KS = 0.14$, teniendo nuevamente un $D_{MAX} = 0.19$, se acepta la Hipótesis nula, insinuando que las observaciones ΔE pueden seguir una distribución Normal.

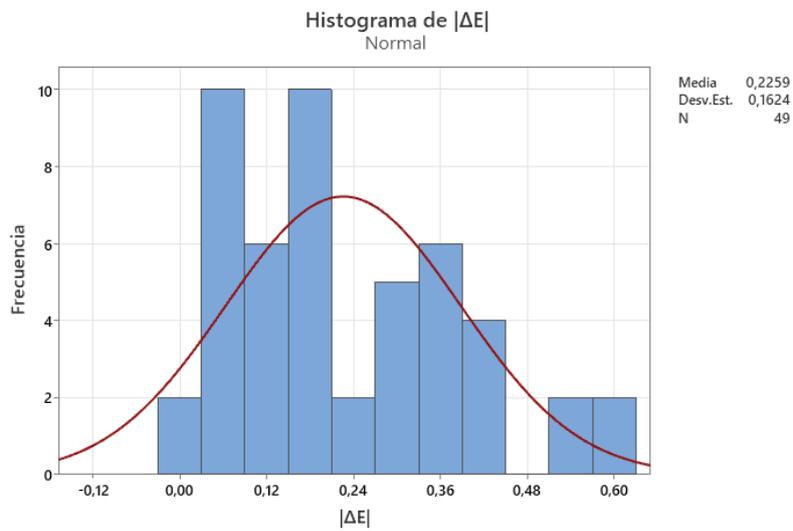


Figura 4.2.12 - Histograma para la variable ΔE y Normal ajustada, Zona II.

- En ΔN :

En este caso, se obtiene para el test de Normalidad:

$$\rho_{valor} = 0.01$$

Indicando que los datos no siguen una distribución Normal ($\rho_{valor} < \alpha = 0.05$).

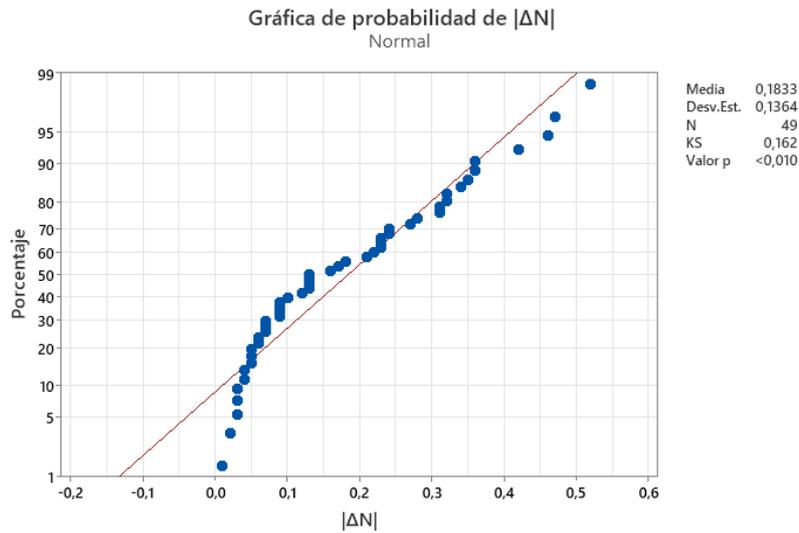


Figura 4.2.13 - Test de Normalidad para la variable ΔN , Zona II.

Sin embargo, la variable $KS = 0.16$, menor al $D_{MAX} = 0.19$, por lo que se acepta la Hipótesis nula, insinuando que las observaciones ΔN pueden seguir una distribución Normal.

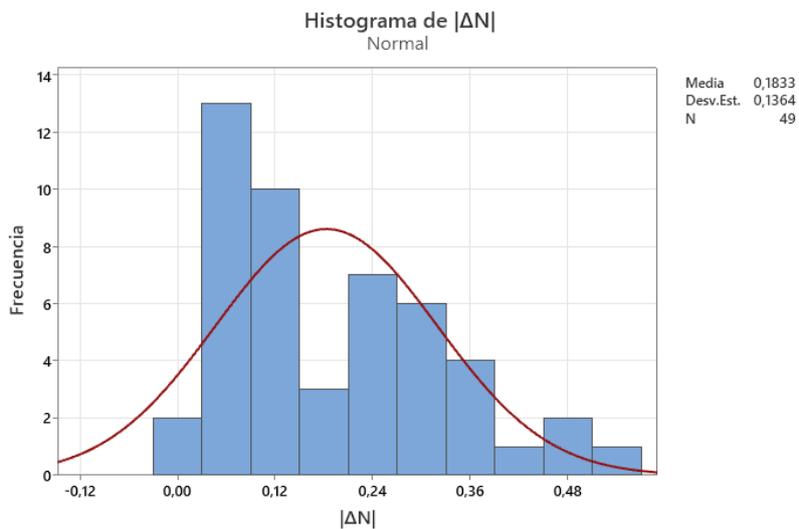


Figura 4.2.14 - Histograma para la variable ΔN y Normal ajustada, Zona II.

- En ΔH :

En este caso, se obtiene para el test de Normalidad:

$$\rho_{valor} = 0.11$$

Se verifica que la coordenada ΔH sigue una distribución Normal ($\rho_{valor} > \alpha = 0.05$)

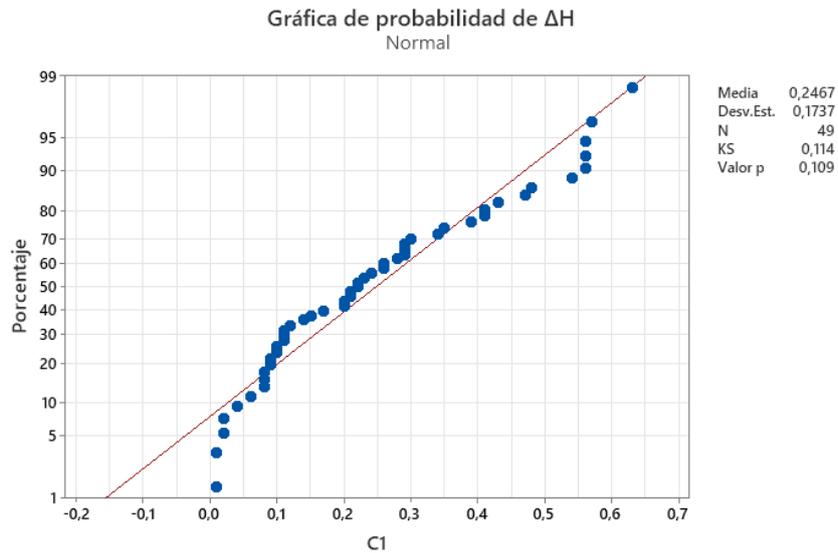


Figura 4.2.15 - Test de Normalidad para la variable ΔH , Zona II.

Al igual que para la componentes anteriores, $KS = 0.11$, menor al máximo $D_{MAX} = 0.19$, aceptando la Hipótesis nula, la coordenada ΔH también sigue una distribución Normal.

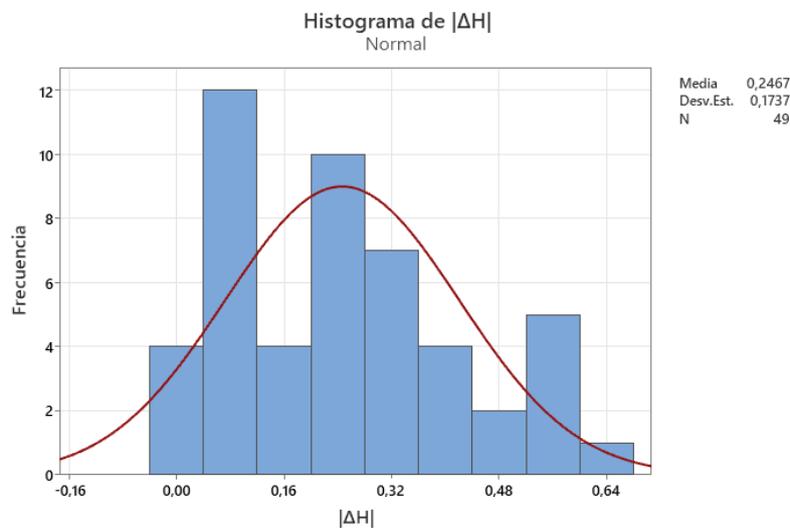


Figura 4.2.16 - Histograma para la variable ΔH y Normal ajustada, Zona II.

Las observaciones de las coordenadas ΔE y ΔN en este caso, no logran verificar una distribución Normal según los test de $\rho_{valor} < 0.05$, pero si lo hacen mediante el test de la distancia $KS < D_{MAX}$, planteando la disyuntiva de si presentar los datos como una distribución Normal o no. Sin embargo, independientemente de la respuesta, se recomienda continuar con el análisis.

En este sentido, en estudios similares, los autores prosiguen con el análisis aun cuando sus datos no cumplen con la distribución Normal, o sin siquiera realizar un test. Este accionar se debe a que la normativa no establece qué hacer cuando los datos no siguen esta distribución, por lo que efectivamente se suele asumir la Normalidad sin realizar ningún tipo de verificación.

Intervalo de confianza al 95%

Se procede a calcular los intervalos de confianza determinados en apartados anteriores:

- En ΔE :

$$\text{Datos: } \bar{V}_{\Delta E} = 0.23m, \quad n = 49 \text{ y } s_{\Delta E} = 0.16m \quad \Rightarrow \quad \begin{cases} I\alpha (v_{\Delta E})_1 = [0.00m, 0.54m] \\ I\alpha (v_{\Delta E})_2 = [0.18m, 0.27m] \end{cases}$$

Al 95% de confianza se determina que:

El valor más probable de ΔE es $\bar{V}_{\Delta E} = 0.23m$.

Dada una nueva observación de ΔE , pertenece al intervalo $0 \leq |\Delta E| \leq 0.54$.

El verdadero valor de ΔE pertenece al intervalo $0.18 \leq |\Delta E| \leq 0.27$.

- En ΔN :

$$\text{Datos: } \bar{V}_{\Delta N} = 0.18m, \quad n = 49 \text{ y } s_{\Delta N} = 0.14m \quad \Rightarrow \quad \begin{cases} I\alpha (v_{\Delta N})_1 = [0.00m, 0.45m] \\ I\alpha (v_{\Delta N})_2 = [0.14m, 0.22m] \end{cases}$$

Al 95% de confianza se determina que:

El valor más probable de ΔN es $\bar{V}_{\Delta N} = 0.18m$.

Dada una nueva observación de ΔN , pertenece al intervalo $0 \leq |\Delta N| \leq 0.45$.

El verdadero valor de ΔN pertenece al intervalo $0.14 \leq |\Delta N| \leq 0.22$.

- En Δr :

$$\text{Datos: } \bar{V}_{\Delta r} = 0.32m, \quad n = 49 \text{ y } s_{\Delta r} = 0.17m \quad \Rightarrow \quad \begin{cases} I\alpha (v_{\Delta r})_1 = [0.00m, 0.65m] \\ I\alpha (v_{\Delta r})_2 = [0.27m, 0.36m] \end{cases}$$

Al 95% de confianza se determina que:

El valor más probable de Δr es $\bar{V}_{\Delta r} = 0.32m$.

Dada una nueva observación de Δr , pertenece al intervalo $0.00 \leq |\Delta r| \leq 0.65$.

El verdadero valor de Δr pertenece al intervalo $0.27 \leq |\Delta r| \leq 0.36$.

- En ΔH :

$$\text{Datos: } \bar{V}_{\Delta H} = 0.25m, n = 49 \text{ y } s_{\Delta H} = 0.17m \Rightarrow \begin{cases} I\alpha(v_{\Delta H})_1 = [0.00m, 0.59m] \\ I\alpha(v_{\Delta H})_2 = [0.20m, 0.30m] \end{cases}$$

Al 95% de confianza se determina que:

El valor más probable de ΔH es $\bar{V}_{\Delta H} = 0.25m$.

Dada una nueva observación de ΔH , pertenece al intervalo $0 \leq |\Delta H| \leq 0.59$.

El verdadero valor de ΔH pertenece al intervalo $0.20 \leq |\Delta H| \leq 0.30$.

Cálculo del estadístico NSSDA

- En $(\Delta E, \Delta N)$:

$$\text{Dado: } RMSE_{\Delta E} = 0.28m \text{ y } RMSE_{\Delta N} = 0.23m \Rightarrow \begin{cases} RMSE_{\Delta r} = 0.36m \\ NSSDA_{\Delta r} = 0.62m \end{cases}$$

Comprobando al 95% de confianza una exactitud planimétrica de 0.62m.

- En (ΔH) :

$$\text{Dado: } RMSE_{\Delta H} = 0.30m \Rightarrow NSSDA_{\Delta H} = 0.59m$$

Comprobando al 95% de confianza una exactitud altimétrica de 0.59 m.

4.2.3 Comparación de los Modelos Digitales de Terreno

En este apartado se exponen los resultados de realizar una comparación entre tres modelos de terrenos: IDEuy, RENARE y el Global (Land Viewer). La cual se realiza en ambas zonas de estudio, en tres etapas:

- En primera instancia, se calculan los errores absolutos para cada modelo, utilizando puntos relevados en forma directa con metodología RTK.
- Luego se comparan los modelos mediante resta de ráster, utilizando el software QGIS, considerando el de la IDEuy, como el de mayor exactitud geométrica.
- Finalmente se realiza un ejercicio práctico, como lo es el cálculo de una cuenca, a partir de un mismo punto de acumulación seleccionado en cada modelo. Se determina entonces la diferencia entre áreas resultantes de cada cuenca generada.

Análisis de los MDT

1. ZONA I- Nueva Helvecia:

- Se calculan los errores absolutos del modelo IDEuy:

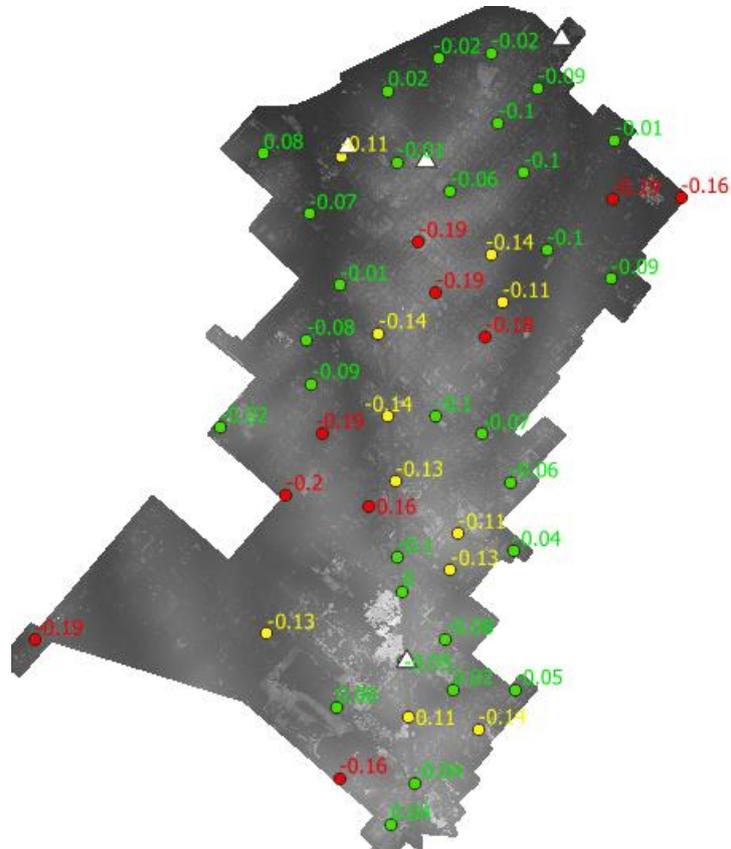


Figura 4.2.17 - Comparación Datos de Campo y modelo IDEuy.

Los diferenciales se clasifican según los siguientes valores:

- $|\Delta H| \geq 0.14\text{m}$ (puntos rojos).
- $0.10\text{m} \leq |\Delta H| \leq 0.14\text{m}$ (puntos amarillos).
- $|\Delta H| \leq 0.10\text{m}$ (puntos verdes).

En la *Figura 4.2.17* se logra apreciar la distribución de los diferenciales calculados y los puntos de apoyo utilizados por la IDEuy (triángulos blancos). Puede observarse que los diferenciales presentan magnitudes menores próximo a los puntos de apoyo, y mayores concentradas en el centro de la Zona I, como es de esperar debido a que los puntos de apoyo se utilizan para realizar el ajuste del modelo en el procesamiento fotogramétrico.

- Se calculan los errores absolutos del modelo de la RENARE:

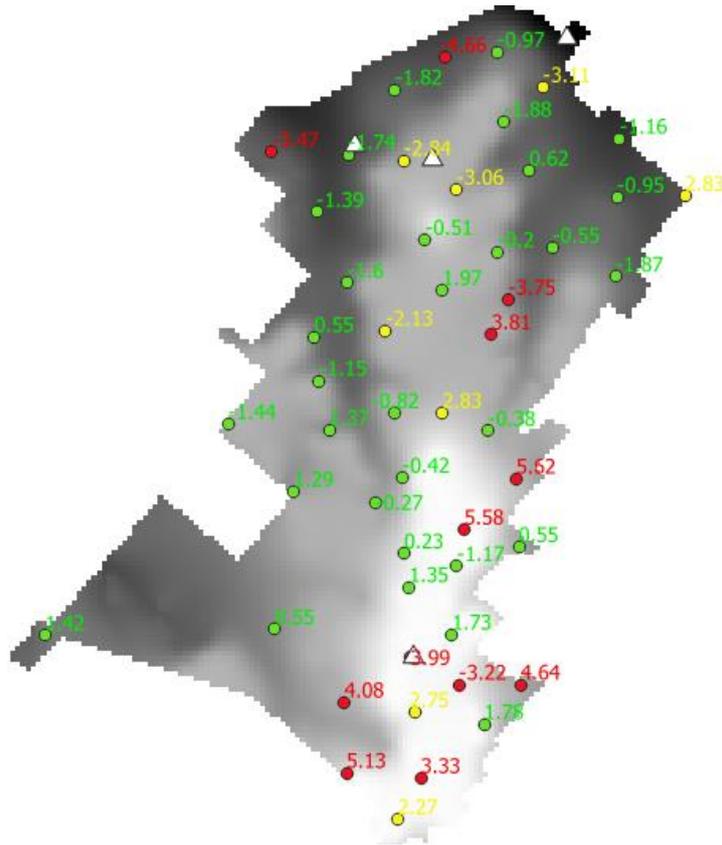


Figura 4.2.18 - Comparación Datos de Campo y modelo RENARE.

Los diferenciales se clasifican según los siguientes valores:

- $|\Delta H| \geq 3.14\text{m}$ (puntos rojos).
- $2.09\text{m} \leq |\Delta H| \leq 3.14\text{m}$ (puntos amarillos).
- $|\Delta H| \leq 2.09\text{m}$ (puntos verdes).

En la *Figura 4.2.18* se logra apreciar la distribución de los diferenciales calculados. Estos no pueden considerarse como errores del modelo en su totalidad, debido a que el mismo se encuentra en un sistema de referencia vertical distinto a los datos tomados en campo.

Para solventar esta problemática es necesario realizar observaciones de puntos pertenecientes a la Red de Nivelación Nacional (TIN), para vincular los sistemas. En este caso no fue posible, al no contar con puntos de la red materializados en la zona.

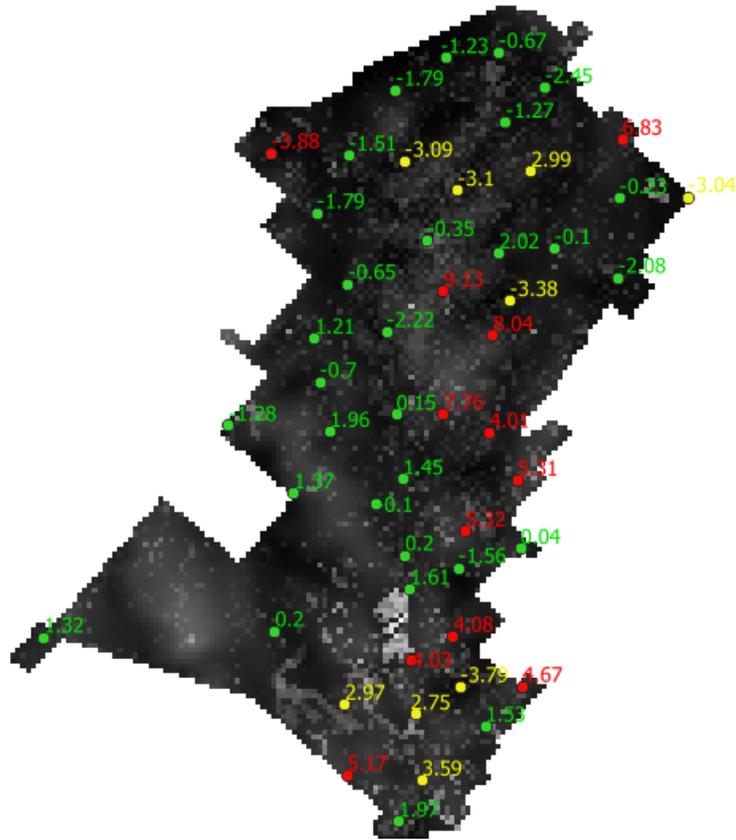


Figura 4.2.19 - Comparación modelos IDEuy - RENARE.

Los diferenciales se clasifican según los siguientes valores:

- $|\Delta H| \geq 3.88\text{m}$ (puntos rojos).
- $2.59\text{m} \leq |\Delta H| \leq 3.88\text{m}$ (puntos amarillos).
- $|\Delta H| \leq 2.59\text{m}$ (puntos verdes).

La distribución de los errores es similar a la realizada con los puntos tomados directo en campo, presentando mayor concentración de error la zona sur-este de la Zona I.

En el modelo ráster calculado se observan tonalidades claras en el extremo sur, zona con mayor diferencia entre modelos, acompañando los resultados puntuales. Estas diferencias se explican por movimientos de suelos recientes del cono suburbano, debido principalmente a nuevas zonas residenciales con continuas mutaciones catastrales.

- Se calculan los errores absolutos del modelo global:

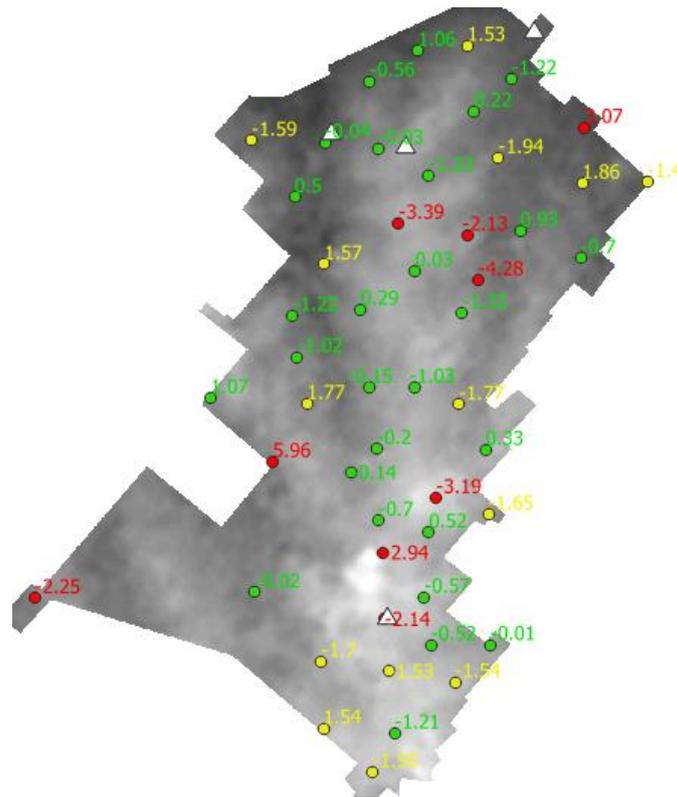


Figura 4.2.20 - Comparación Datos de Campo y modelo Global.

Los diferenciales se clasifican según los siguientes valores:

- $|\Delta H| \geq 2.04\text{m}$ (puntos rojos).
- $1.36\text{m} \leq |\Delta H| \leq 2.04\text{m}$ (puntos amarillos).
- $|\Delta H| \leq 1.36\text{m}$ (puntos verdes).

Al contrario de lo esperado, el promedio de las desviaciones resulta menor al promedio calculado para el MDT de la RENARE., esto se debe principalmente a que en el modelo Global se tiene en cuenta movimientos de suelos hechos en la zona sur de la Ciudad, no así en el modelo de la RENARE.

Por lo tanto, estamos frente a un MDT que presenta una exactitud similar o mejor que el de la RENARE, debido principalmente a la diferencia del sistema de referencia, y al estar más actualizado en relación a los movimientos de terreno.

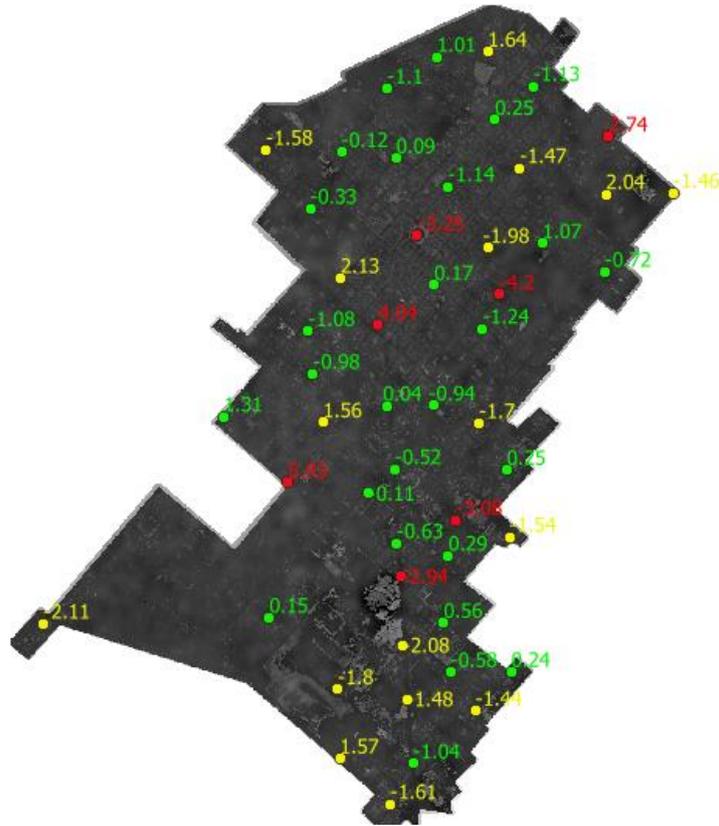


Figura 4.2.21 - Comparación modelos IDEuy – GLOBAL.

Los diferenciales se clasifican según los siguientes valores:

- $|\Delta H| \geq 2.13\text{m}$ (puntos rojos).
- $1.42\text{m} \leq |\Delta H| \leq 2.13\text{m}$ (puntos amarillos).
- $|\Delta H| \leq 1.42\text{m}$ (puntos verdes).

A diferencia del caso anterior, comparación modelo de la IDEuy- RENARE, los matices de la escala de grises no presentan gran diferencia entre modelos (Figura 4.2.21), ni tampoco existen grandes saltos a colores claros. Las justificaciones pueden considerarse las mismas ya mencionadas en la comparación anterior, entre Datos de Campo y MDT Global.

2. ZONA II- Fraile Muerto:

- Se calculan los errores absolutos del modelo IDEuy:

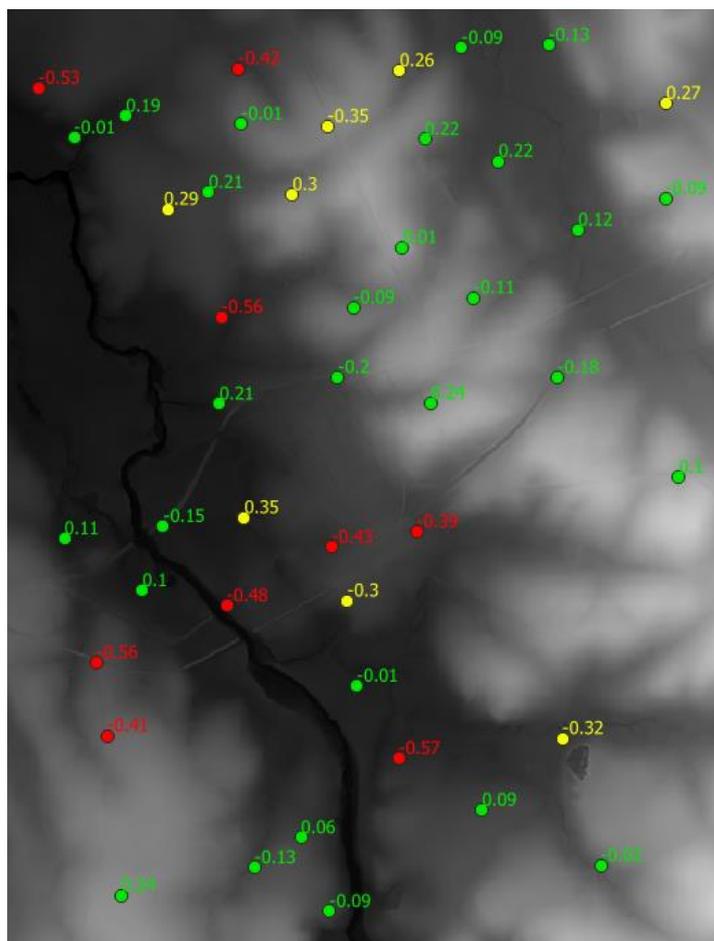


Figura 4.2.22 - Comparación Datos de Campo y modelo IDEuy.

Los diferenciales se clasifican según los siguientes valores:

- $|\Delta H| \leq 0.25\text{m}$ (puntos verdes).
- $0.25\text{m} \leq |\Delta H| \leq 0.37\text{m}$ (puntos amarillos).
- $|\Delta H| \geq 0.37\text{m}$ (puntos rojos).

En la *Figura 4.2.22* se aprecia la distribución de los diferenciales calculados, dejando entrever que los valores más grandes se distribuyen en su mayoría próximos al arroyo (Arroyo Fraile Muerto) y sus afluentes, pudiendo deberse a desprendimientos y sedimentaciones que el mismo genera, como también a la dificultad en la densificación de puntos durante el proceso fotogramétrico, por la densa cobertura de árboles.

- Se calculan los errores absolutos del modelo de la RENARE:

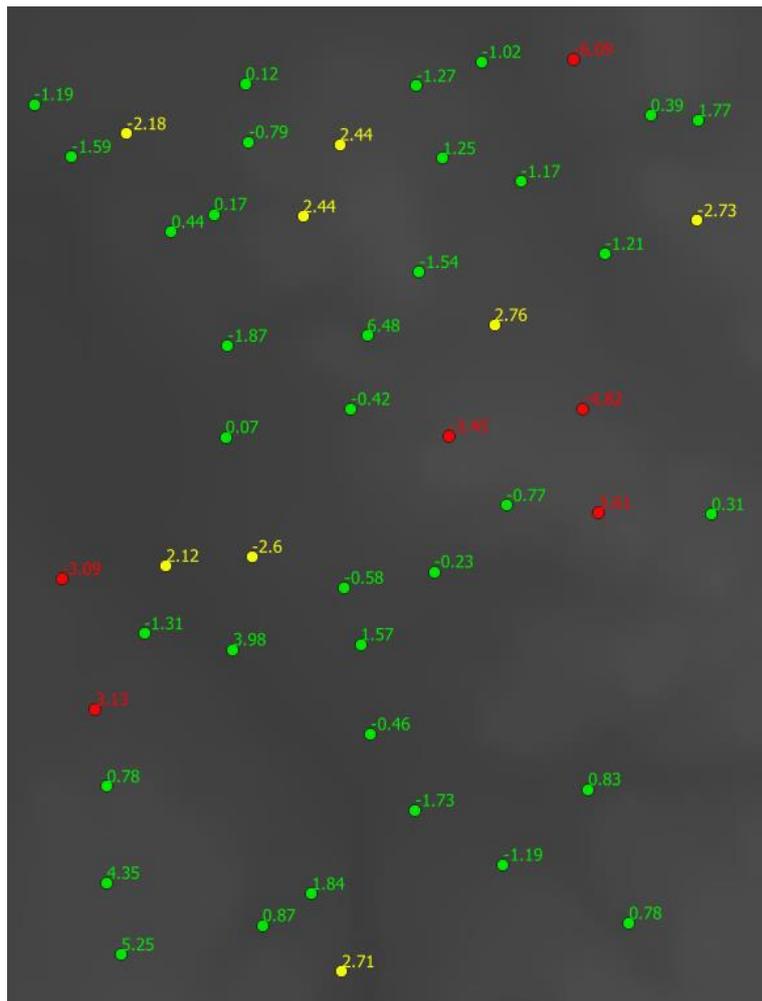


Figura 4.2.23 - Comparación Datos de Campo y modelo RENARE.

Los diferenciales se clasifican según los siguientes valores:

- $|\Delta H| \leq 1.91\text{m}$ (puntos verdes).
- $1.91\text{m} \leq |\Delta H| \leq 2.87\text{m}$ (puntos amarillos).
- $|\Delta H| \geq 2.87\text{m}$ (puntos rojos).

En la *Figura 4.2.23* se muestra la distribución de los diferenciales calculados. Para este caso no se logra observar tendencia alguna en cuanto a magnitud o la distribución de los diferenciales.

En este caso, tampoco se cuenta con puntos relevados pertenecientes a la Red Geográfica Militar, que permita vincular los sistemas de referencia altimétricos, por lo que las desviaciones calculadas se ven afectadas por esta variable.

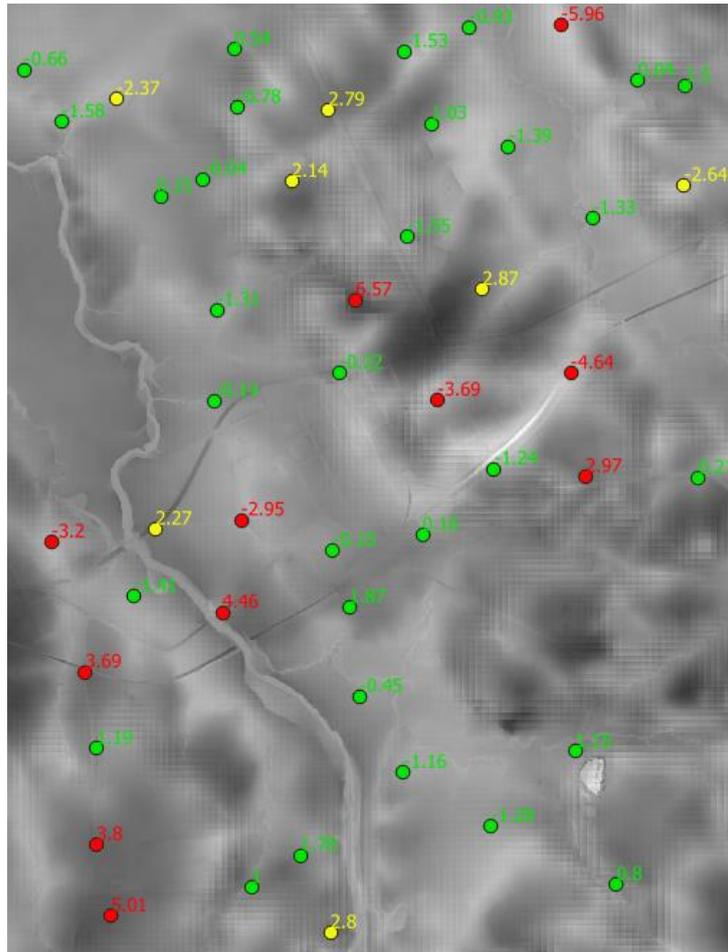


Figura 4.2.24 - Comparación modelos IDEuy - RENARE.

Los diferenciales se clasifican según los siguientes valores:

- $|\Delta H| \leq 1.90\text{m}$ (puntos verdes).
- $1.90\text{m} \leq |\Delta H| \leq 2.85\text{m}$ (puntos amarillos).
- $|\Delta H| \geq 2.85\text{m}$ (puntos rojos).

La distribución es también similar a la comparación con los puntos tomados en campo. Se observa una tendencia de puntos con mayor diferencia sobre las áreas pobladas, a causa de diferencias temporales entre modelos, al ser las zonas pobladas donde más cambios se producen.

En cuanto a la comparación entre modelos, es notorio que la principal causa de diferencia se tiene por el mayor grado de detalle que brinda el modelo de la IDEuy, con el que se observa claramente la influencia de las calles, caminos, rutas y el propio arroyo; mientras que, con el MDT de la RENARE, se observa solamente este último.

- Se calculan los errores absolutos del modelo global:

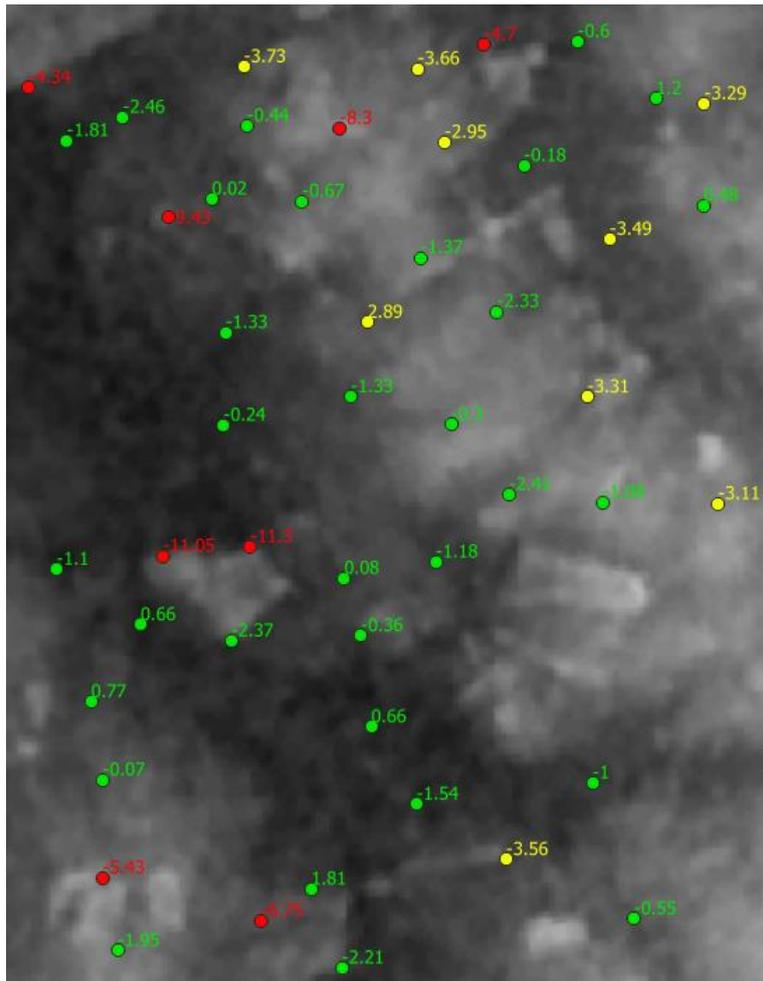


Figura 4.2.25 - Comparación Datos de Campo y modelo Global.

Los diferenciales se clasifican según los siguientes valores:

- $|\Delta H| \leq 2.50\text{m}$ (puntos verdes).
- $2.50\text{m} \leq |\Delta H| \leq 3.75\text{m}$ (puntos amarillos).
- $|\Delta H| \geq 3.75\text{m}$ (puntos rojos).

En la *Figura 4.2.25* se logra apreciar la distribución de los diferenciales calculados.

En este caso, el promedio de las desviaciones sí es mayor al promedio calculado para el MDT de la RENARE, como era de esperarse, a diferencia de la Zona I. Las principales diferencias se observan en puntos próximos al arroyo.

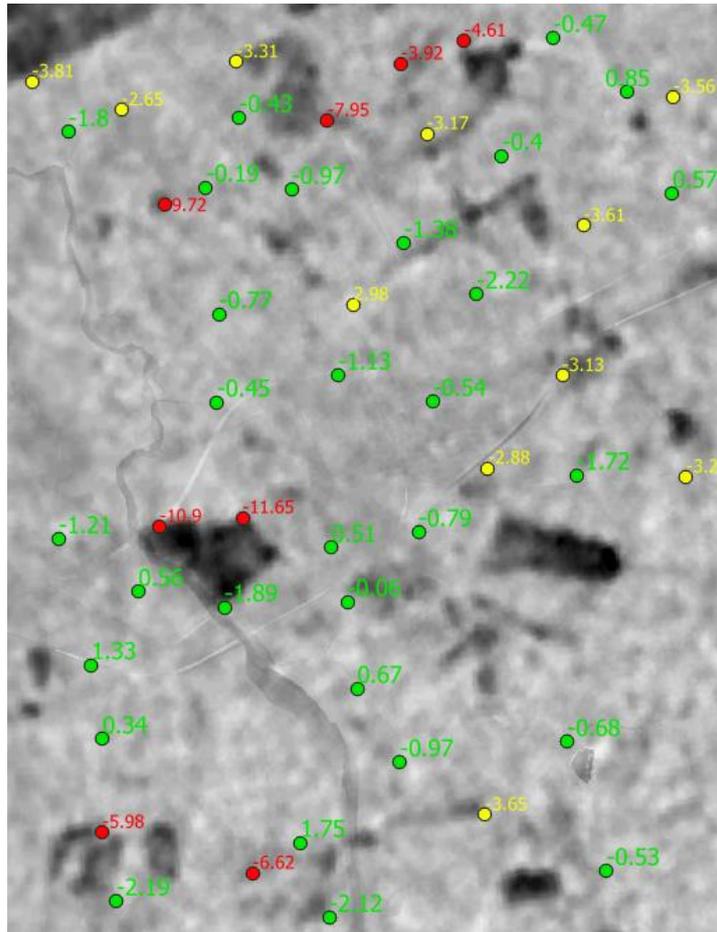


Figura 4.2.26 - Comparación modelos IDEuy - GLOBAL.

Los diferenciales se clasifican según los siguientes valores:

- $|\Delta H| \leq 2.49\text{m}$ (puntos verdes).
- $2.49\text{m} \leq |\Delta H| \leq 3.74\text{m}$ (puntos amarillos).
- $|\Delta H| \geq 3.74\text{m}$ (puntos rojos).

En la *Figura 4.2.26* se logran ver con más claridad las zonas donde se presentan mayores diferencias. Estas se encuentran bien delimitadas, y probablemente surgen por una mala clasificación de los píxeles en el modelo global, al no eliminar todas las zonas arboladas. Teniendo en cuenta nuevamente que este es un modelo de suelo, no debería contemplar estas elevaciones.

Aplicación de los MDT

Para comparar los modelos de forma práctica se elige la construcción de una misma cuenca a partir de cada MDT. Para su construcción se utiliza el mapa de puntos de acumulación de agua y el de dirección de drenaje (rásters calculados en QGIS), por lo tanto, es independiente del sistema altimétrico utilizado en los modelos y hace factible la comparación de las cuencas.

Se utiliza la siguiente denominación:

- Sólido rojo: cuenca generada a partir del MDT de la IDEuy.
- Diagonal X azul: cuenca a partir del MDT Global.
- Diagonal X amarillo: cuenca a partir del MDT de la RENARE.

1. ZONA I- Nueva Helvecia:

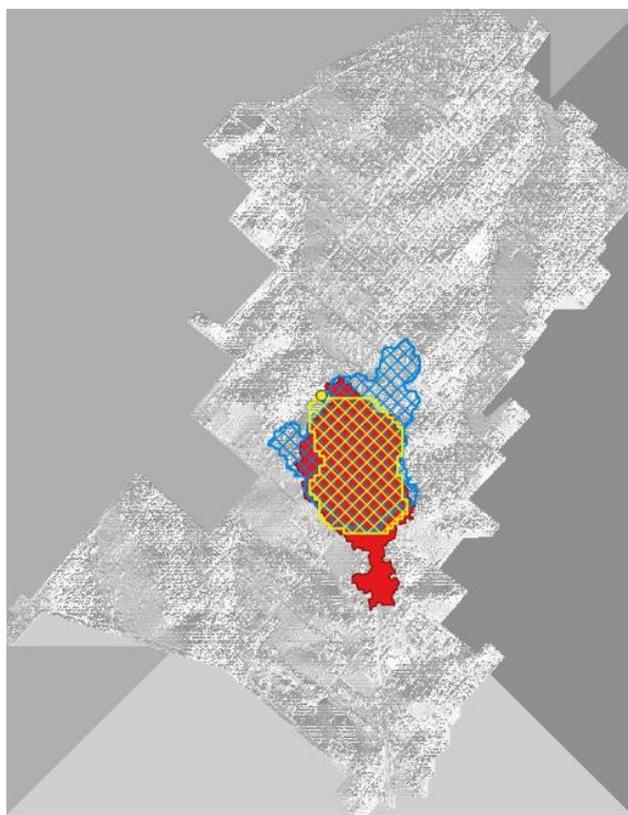


Figura 4.2.27 - Cuencas en Zona I.

En la *Figura 4.2.27* se observan las cuencas generadas por los tres MDT estudiados a partir de un mismo punto de acumulación de agua. Este punto se selecciona manualmente en donde existe una bifurcación de dos canales, siendo de fácil ubicación en cada modelo.

Se calcula el área de cada cuenca generada y se realiza la comparación entre estas:

MDT	Area	DIF	%
IDEuy	54Has 3997	-	-
RENARE	41Has 7929	-12Has 6068	23
Global	61Has 6295	7Has 2298	13

Tabla 4.2.9 - Diferencia de área entre cuencas.

En la *Tabla 4.2.9* se observa que la diferencia entre modelos es notoria, no solo en su distribución, sino también en magnitud. Al comparar las áreas de las cuencas Global y la RENARE con la de la IDEuy, se determina una diferencia del 13% y 23% respectivamente, porcentajes nada despreciables. Aun cuando los errores porcentuales no son tolerables, debe tenerse presente que este es relativo al área estudiada y por lo tanto disminuye en función de una mayor superficie de cuenca.

Ratificando lo expuesto anteriormente, se aprecia una mayor similitud de la cuenca de la IDEuy y la del Global, que con la de la RENARE.

2. ZONA II- Fraile Muerto:

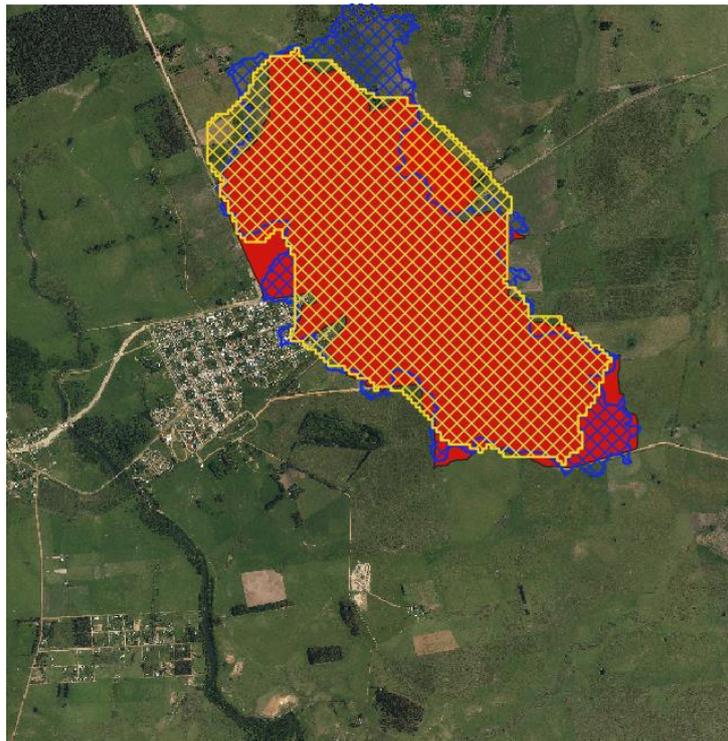


Figura 4.2.28 - Cuencas en Zona II.

En la *Figura 4.2.28* se observan las cuencas generadas por los tres MDT estudiados, a partir del mismo punto de acumulación, determinado manualmente. En este caso no se toma una bifurcación, sino un punto sobre el canal, identificando la misma posición en todos los modelos.

MDT	Area	DIF	%
IDEuy	447Has 5116	-	-
RENARE	451Has 1912	3Has 6796	1
Global	464Has 9260	17Has 4144	4

Tabla 4.2.10 - Diferencia de áreas entre cuencas.

En la *Tabla 4.2.10* se observan diferencias porcentuales extremadamente pequeñas, comparadas a las obtenidas para la Zona I, que no acompañan lo visualizado en la *Figura 4.2.28*, donde claramente existen grandes áreas no abarcadas por alguno de los modelos. Esto se puede explicar al tratarse de una superficie extensa, dando lugar a que se compensen las áreas faltantes por un lado con las sobrantes por otro.

En este caso, ambos modelos, Global y RENARE, tienen bastante similitud con la cuenca generada por el modelo de la IDEuy. Siendo levemente más acertado el de la RENARE, pero las grandes zonas de exceso y falta de área, hacen que no sea totalmente equivalente.

CAPÍTULO 5 - Conclusiones Finales

5.1 Conclusiones Generales

En la actualidad, ha aumentado significativamente el uso de los productos generados a partir del Vuelo Nacional 2017-2018, en particular ortomosaicos y MDT realizados por la IDEuy. Al tratarse de modelos de gran exactitud y carácter nacional, es inevitable su aplicación en diferentes áreas de trabajo de ingeniería.

En este marco, cobra especial importancia el estudio de su exactitud geométrica, la cual tomando como base las prácticas desarrolladas, es necesario comparar con observaciones directas tomadas en campo a partir de levantamientos GNSS.

Al analizar el MDT de la IDEuy, resulta una clara superioridad respecto a los existentes hasta el momento, como fue visto al comparar este con su sucesor el MDT de la RENARE y un MDT global, estos presentan una exactitud geométrica entre 10 y 20 veces mayor, diferenciando las áreas urbanas y rurales respectivamente. Sumado a que este es un modelo de fácil adaptabilidad debido a su sistema de referencia global.

Por lo que se concluye, es factible su aplicación en anteproyectos para obras de ingeniería, como pueden ser trazados de rutas, canales, represas de agua, entre otros. No obstante, su utilización está sujeta a las exigencias de cada trabajo en particular, o riesgos que se puedan asumir por parte de los profesionales.

Finalmente, se aclara que los errores calculados en este informe están sujetos a las zonas de estudio seleccionados y no necesariamente son extrapolables a toda la cobertura del modelo.

5.2 Conclusiones Específicas

- Cuantificación de la exactitud geométrica de los modelos digitales de la IDEuy 2017-2018 sobre las zonas de estudio seleccionadas:
 - En la Zona I se estudió la exactitud geométrica del modelo de la IDEuy, clasificada como urbana con un píxel de 10cm.
 - Para este caso, se logran errores planimétricos promedio de 11cm, similar al tamaño de píxel del modelo. Sin embargo, al calcular el estadístico NSSDA, este valor aumenta a 20cm.
 - En relación a la altimetría, se obtienen errores promedio de 10cm y un coeficiente NSSDA de 22cm.
 - En la Zona II se estudió la exactitud geométrica del modelo de la IDEuy, clasificada como rural con un píxel de 30cm.
 - Para este caso, se logran errores planimétricos promedio de 32cm, similar al tamaño de píxel del modelo. Sin embargo, al calcular el estadístico NSSDA, este valor aumenta a 62cm.
 - En relación a la altimetría se obtienen errores con un promedio de 25cm y un coeficiente NSSDA de 59cm.
- Comparación de metodologías de posicionamiento diferencial GNSS:

Se realiza la comparación de 3 metodologías RTK (con base propia, con base del IGM y utilizando VRS), comparando estas con coordenadas de mayor exactitud calculadas a partir de un levantamiento Estático. Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en los relevamientos GNSS realizados con el fin de evaluar la calidad posicional de los MDT, se concluye que a la hora de evaluar la mejor metodología de relevamiento RTK, se debe tener en cuenta la distancia BASE-MOVIL.

- La metodología RTK con base propia presenta mayor exactitud planimétrica y altimétrica (1cm). Esto no es sorpresa dada la cercanía entre receptores (2km), eliminando adecuadamente errores ionosféricos y troposféricos.
- La metodología RTK con bases del IGM tuvo precisiones diferentes según la base utilizada en cada zona, principalmente debido a la distancia entre base y móvil.
 - A 35km, se logran precisiones planimétricas de 2cm y altimétricas de 4cm.
 - A 50km, se logran precisiones planimétricas de 4cm y altimétricas de 9cm.
 - A 60-80km, se obtienen errores superiores. Sin embargo, el mayor problema se presenta al obtener soluciones fijas libres de ambigüedades.
- La metodología VRS, logra exactitudes similares o mayores a la metodología RTK con bases del IGM.

- Análisis de calidad del MDT-RENARE y un MDT global (Land Viewer), comparando con el MDT de la IDEuy, de mayor precisión.

Se realiza un estudio de exactitudes absolutas sobre los MDTs a partir de datos tomados en campo. Resultando el MDT de la IDEuy el de mayor exactitud geométrica, de 10cm y 25cm diferenciando entre urbano y rural. Esto debido principalmente al pequeño tamaño de pixel del modelo y por ser realizado a partir de un vuelo fotogramétrico reciente (2017-2018).

- El MDT de la RENARE presenta un error en exactitud de 2.09m para la Zona I y 1.91m para la Zona II, valores muy similares. Teniendo en cuenta que estos errores además de estar sujetos al tamaño del píxel y cambios temporales, se encuentran afectados por la diferencia entre sistemas de referencia de alturas.
- Al observar el MDT global, se tienen errores de 1.36m para la Zona I y 2.50m para la Zona II, errores poco similares. En este caso no se deben al tamaño del píxel, sino a diferencias temporales y errores en la confección del modelo, por ejemplo, al catalogar erróneamente zonas arboladas.

CAPÍTULO 6 - Referencias Bibliográficas

6.1 BIBLIOGRAFÍA

ACQUA, Martín Dell'. 2004. "Metodología e información utilizada para la elaboración de un modelo digital de terreno". Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca. Uruguay.

ALBAGLI, Karen Janet y Martin, Benjamín Andrés. 2018. "Control de calidad posicional de cartografía digital con métodos estadísticos, según normas ISO 19.100". Facultad de Ingeniería. Argentina.

ASIN, Fernando Martin. 1990. "Geodesia y Cartografía Matemática" 3er Ed. Instituto Geográfico Nacional. Madrid, España.

ATKINSON, Alean D.J. y Ariza Francisco J. 2005. "Control de Calidad posicional en cartografía: análisis de los principales estándares y propuesta de mejoras". Universidad de Jaén.

BARBATO, Fabián D. 2004. "Control de Precisión Posición de la Cartografía Base de la Intendencia de Municipal de Montevideo- Uruguay". Facultad de Ingeniería. Uruguay.

BARRIENTOS, María, Luis Velozo, y otros. 2004. "Principios y métodos de la fotointerpretación" Santiago de Chile.

BERNÉ, José Luis – Anquela Julián, Ana Belén – Garrido Villén, Natalia. 2014. "GNSS: GPS: Fundamentos y aplicaciones en Geomática". Editorial de la Universidad Politécnica de Valencia, España.

COLOMBANA Carlos I., Reyes José Ignacio y Carlevaro Mauro. 2015. "Valuación de la exactitud posicional planimétrica de Google Earth para Uruguay". Proyecto de grado, Tecnólogo en Cartografía. Facultad de Ingeniería. Uruguay.

DE LERMA, Miguel J. 1999. "Introducción histórica a la geodesia". Facultad de Ciencias Matemáticas. Universidad Complutense de Madrid.

FGDC (Federal Geographic Data Committee). 1998. "Geospatial Positioning Accuracy Standards, Part 3: National Standard for Spatial Data Accuracy". FGDC-STD-007.3. Estados Unidos.

GONZALEZ, Castor Guisande y otros. 2006. "Tratamiento de Datos". Universidad de Vigo. España.

INSTITUTO DE AGRIMENSURA, Apuntes de la asignatura Cartografía Matemática. 2019. Departamento de Geomática. Facultad de Ingeniería. Uruguay.

INSTITUTO DE AGRIMENSURA, Apuntes de la asignatura Geodesia 3. 2019. Departamento de Geodesia. Facultad de Ingeniería. Uruguay.

INSTITUTO DE AGRIMENSURA, Apuntes de la asignatura Teoría de Errores. 2016. Departamento de Geodesia. Facultad de Ingeniería. Uruguay.

INTROCASO, Antonio. 2006 “Geodesia física”. Boletín del Instituto Fisiografía y Geología. Rosario, Argentina.

LESPARRE, Katherine Ruth. 2020. “Control de exactitud planialtimétrica de MDT y comparación de modelos topográficos en una centralidad de Ciudad del Plata: apoyo al estudio de escurrimiento superficial”. Proyecto de grado. Facultad de Ingeniería. Uruguay.

LOPEZ, Rocío y Esteban Striewe. 2011. Proyecto de grado. Facultad de Ingeniería. Uruguay.

ORDUÑA, John Alexander. 2019. “Fundamentos y aplicaciones del Posicionamiento Puntual Preciso. (PPP: Precise Point Positioning)”. Universidad de Salamanca.

PLAZAOLA, Fernández. 2003. “Técnicas de resolución de la ambigüedad de las medidas de fase en sistemas de navegación por satélite”. Universidad de Málaga.

RIMOLI, Nicolás Kunz y Pablo Secco Basile. 2017. “Estudio de las exactitudes obtenidas en relevamientos GNSS-RTK mediante VRS y DGNSS”. Proyecto de grado. Facultad de Ingeniería. Uruguay.

Sitio oficial de la República Oriental del Uruguay (gub.uy). 2018. Vuelo Fotogramétrico Nacional.