



MINISTERIO DE
DEFENSA
NACIONAL



INSTITUTO
GEOGRÁFICO
MILITAR

FISCALIZACIÓN DE LA EXACTITUD POSICIONAL EN LA COMPONENTE VERTICAL EN PRODUCTOS CARTOGRÁFICOS

INSTITUTO GEOGRÁFICO MILITAR

-GEODESIA

-DIRECCIÓN DE IIDE, NORMALIZACIÓN
Y ARCHIVO NACIONAL

2 da
edición

2024

CONTENIDO

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1. ANTECEDENTES..... | 3 |
| 2. OBJETIVO..... | 3 |
| 3. ALCANCE..... | 3 |
| 4. DEFINICIONES GENERALES | 3 |
| 5. SIGLAS ACRÓNIMOS | 5 |
| 6. REFERENCIAS CON OTRAS NORMAS Y ESPECIFICACIONES TÉCNICAS | 5 |
| 7. INTRODUCCIÓN | 5 |
| 8. CONSIDERACIONES GENERALES | 6 |
| 8.1 Escala y equidistancia entre curvas de nivel (intervalo de curva)..... | 6 |
| 8.2 Origen para las alturas..... | 7 |
| 8.3 Precisión y exactitud en curvas de nivel | 8 |
| 8.4 Precisiones finales altimétricas para cartografía analógica o impresa | 8 |
| 9. CONTROL DE LA EXACTITUD POSICIONAL VERTICAL PARA PRODUCTOS CARTOGRÁFICOS DIGITALES..... | 9 |
| 9.1 Exactitud vertical | 10 |
| 9.2 Exactitud vertical según la National Standard for Spatial Data Accuracy (NSSDA) | 11 |
| 9.3 Relación entre NSSDA y RMSE (vertical) | 12 |
| 9.4 Relación entre NSSDA y National Map Accuracy Standards - NMAS (vertical) para determinar el máximo permisible en exactitud posicional | 12 |
| 10. EVALUACIÓN DE LA EXACTITUD POSICIONAL VERTICAL PARA PRODUCTOS CARTOGRÁFICOS | 13 |
| 10.1. Productos vectoriales..... | 13 |
| 10.2. Productos Raster..... | 14 |
| 11. MUESTREO PARA TOMA DE PUNTOS EN ORTOFOTOS Y MDT..... | 15 |
| 12. REFERENCIAS | 16 |

FISCALIZACIÓN DE LA EXACTITUD POSICIONAL EN LA COMPONENTE VERTICAL EN PRODUCTOS CARTOGRÁFICOS

1. ANTECEDENTES

La Ley de la Cartografía Nacional y su Reglamento, faculta al IGM la generación de cartografía básica a nivel Nacional, siguiendo especificaciones y normativas de entidades productoras, sea a nivel nacional (IGM) como internacional (IPGH, NGA y MGCP), con el fin de homogenizar la información cartográfica a diversas escalas.

El Art. 44 del Reglamento a la Ley de la Cartografía Nacional, establece que: “*los trabajos autorizados de conformidad con el Art. 42 del presente Reglamento, serán supervisados, fiscalizados y aprobados por el Instituto Geográfico Militar*”; por lo que es necesario establecer los criterios técnicos de generación de información.

Adicionalmente se debe establecer que todo punto perteneciente a un levantamiento geodésico en su componente vertical, deberá estar referido al Datum Vertical Vigente.

2. OBJETIVO

Este documento establece las especificaciones técnicas y requerimientos para la exactitud posicional en la componente vertical para productos cartográficos, independientemente del método de extracción utilizado; como restitución fotogramétrica (3D), LIDAR o levantamientos topográficos-Geodésicos.

3. ALCANCE

Estas especificaciones deben ser aplicadas por todas las personas naturales o jurídicas, autorizadas por la Ley de la Cartografía Nacional, que elaboran actividades de cartografía.

4. DEFINICIONES GENERALES

Los términos empleados en estas especificaciones que se exponen a continuación, corresponden a las definiciones que se encuentran en diferentes fuentes de información; entre las cuales se pueden mencionar:

- 1) Vocabulario Internacional de términos fundamentales y generales de metrología (VIM)
- 2) Glosario de términos cartográficos de la Universidad de Alicante
- 3) Glosario de términos cartográficos de la Universidad de Buenos Aires
- 4) Glosario de Términos Consejo Nacional de Geoinformática (CONAGE)
- 5) Manual de especificaciones técnicas Geodesia, IGM.

Altura Elipsoidal: Representan la distancia entre la superficie terrestre y el elipsoide de referencia a lo largo de la normal al mismo.

Altura Ortométrica: Representan la distancia entre la superficie terrestre y el geoide, a lo largo de la dirección de la gravedad (plomada).

Altura Geoidal: Se puede definir como la diferencia entre el elipsoide y el geoide

Cámara Digital: Es el dispositivo fotográfico matricial o de línea que permite la colecta de fotografías en formato digital; sus características ópticas (distorsiones de la lente) y elementos de orientación interior (distancia focal y geometría de construcción) son determinados con exactitud e integrados a un reporte de calibración.

Cartografía básica: Es aquella que se obtiene por procesos directos de observación y medición de la superficie terrestre, sirviendo de base y referencia para su uso generalizado como representación gráfica de la Tierra. La cartografía básica puede ser topográfica o náutica.

Cartografía Analógica: Conjunto de operaciones con las que se representa información del territorio en dos dimensiones, plasmados en un formato plano o papel.

Cartografía digital: Conjunto de operaciones con las que, partiendo de datos numéricos obtenidos por cualquier procedimiento, se elabora una carta trabajando sobre un ordenador con ayuda de software específico.

Calidad: Grado con el que un conjunto de características inherentes cumple los requisitos (Norma ISO 9000).

Geopotencial: Se define como la energía potencial que posee un cuerpo en virtud de hallarse en el campo de gravitación terrestre, referido a un nivel arbitrario o cero, que se toma correspondiendo con el nivel medio del mar.

Control de Calidad: Proceso de verificación (cuantitativo) del cumplimiento de los elementos de calidad definidos en las especificaciones técnicas.

Cuasigeoide: Superficie no equipotencial, muy próxima al geoide. Su determinación no requiere de hipótesis geofísicas y se basa en el modelamiento matemático del campo de gravedad normal.

Elipsoide: está definido por una superficie de referencia, que se genera a partir de la rotación alrededor de su eje menor (superficie de revolución) y por los parámetros geométricos intrínsecos de la figura.

Exactitud: Grado de concordancia entre el resultado de una prueba y el valor de referencia aceptado (por lo general valores observados).

Exactitud posicional: Proximidad del valor de la coordenada respecto al valor verdadero o aceptado en un sistema de referencia especificado (valores observados).

Geoide: Es una superficie de nivel equipotencial del campo gravitatorio terrestre de cota cero, la cual coincide con la prolongación debajo de la superficie continental, de los mares y océanos sin el efecto perturbador de sus mareas.

Potencial: Por definición, la energía de un cuerpo es su capacidad para desarrollar un trabajo y, en ese sentido, la cantidad total de energía almacenada en un objeto (su energía interna) determina la cantidad de trabajo que ese objeto puede realizar. En tanto esa energía que no se pone en funcionamiento para la realización de trabajo constituye sólo lo que se denomina como energía potencial porque, en efecto, es sólo un potencial que en un momento determinado puede ponerse en movimiento.

Precisión: Medida de la repetitividad de un conjunto de mediciones, se expresa generalmente como un valor estadístico basado en un conjunto de mediciones repetidas, tales como la desviación estándar de la media de la muestra.

5. SIGLAS ACRÓNIMOS

GNSS: Global Navigation Satellite System (Sistemas de posicionamiento Global)

IGM: Instituto Geográfico Militar

IHRF: International Height Reference Frame (Marco de referencia internacional de alturas)

ITRF: International Terrestrial Reference Frame (Marco de referencia internacional)

ITRS: International Terrestrial Reference system (Sistema de referencia internacional)

IPGH: Instituto Panamericano de Geografía e Historia

LIDAR: Light Detection and Ranging o Laser Imaging Detection and Ranging

NSSDA: National Standard for Spatial Data Accuracy (Estándar Nacional para la Precisión de datos espaciales)

VIM: Vocabulario Internacional de términos fundamentales y generales de metodología

6. REFERENCIAS CON OTRAS NORMAS Y ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

Las especificaciones técnicas para la exactitud posicional para productos cartográficas, han sido adoptadas considerando la documentación técnica de la NSSDA, IPGH y experiencias adquiridas en el desarrollo de proyectos oficiales realizados por las áreas de producción cartográfica del IGM, de acuerdo al siguiente detalle:

ASPRS, American Society for Photogrammetry and Remote Sensing. Edición 1, versión 1.0, noviembre 2014.

NSSDA, National Standard for Spatial Data Accuracy (1998). Geospatial Positioning Accuracy Standards.

IGM, Instituto Geográfico Militar 2020. Manual de especificaciones técnicas Geodesia.

7. INTRODUCCIÓN

De igual forma que en el caso de la componente horizontal, la componente vertical representada en los productos cartográficos debe ser evaluada con el objeto de garantizar el cumplimiento de los estándares mínimos impuestos en términos de exactitud posicional. Esta evaluación se realiza en función de criterios y estándares establecidos y divulgados por organismos encargados de la normalización de procedimientos y técnicas para la generación de cartografía.

Distintos métodos son empleados para el levantamiento de información altimétrica con el objeto de representar el relieve. En general el método usado para la obtención de alturas, depende de la extensión del área a ser cartografiada, la escala cartográfica nominal, y por tanto de las

precisiones mínimas requeridas/declaradas para el producto cartográfico. Entre las principales técnicas utilizadas para esta finalidad se pueden señalar: GNSS- *Global Navigation Satellite System* (alturas elipsoidales obtenidas mediante la técnica de posicionamiento satelital), GNSS y Modelos Globales de Geopotencial (alturas derivadas de alturas elipsoidales y alturas geoidales o cuasigeoidales derivadas de modelos geoidales/modelos cuasigeoidales), vuelos aerofotogramétricos (cámaras analógicas, cámaras digitales), levantamientos LIDAR, interferometría por radar de apertura sintética (InSAR), nivelación trigonométrica, nivelación geométrica, nivelación GNSS (aproximación a los desniveles geométricos obtenidos por nivelación geométrica, mediante la propagación de desniveles geoidales provenientes de modelos locales o globales), etc.

El procedimiento estándar para la generación de cartografía, involucra la realización de un proceso fotogramétrico, el cual implica a su vez la realización de observaciones geodésicas de distinta índole para el establecimiento de puntos de control en el terreno (GCP – *Ground Control Points*) que son usados para el ajuste de las fotografías adquiridas.

La evaluación de la componente vertical es realizada, por tanto, a nivel de los puntos de control (GCP) y/o de los productos cartográficos generados. En todos los casos los criterios (estándares) para la evaluación de la calidad en términos de la exactitud posicional, serán establecidos en función de la escala nominal para la representación cartográfica.

En términos generales, la evaluación de la exactitud posicional tanto en la componente vertical como horizontal, se basa en la definición de estándares mínimos cuyo cumplimiento se analiza mediante métodos estadísticos. En este contexto, la selección de una muestra consistente y válida para la ejecución de estos procedimientos, constituye un factor crítico.

8. CONSIDERACIONES GENERALES

En esta sección, algunos conceptos de base son presentados para abordar los procedimientos de fiscalización de la componente vertical en los insumos y productos cartográficos. Estos conceptos hacen referencia a criterios básicos a ser considerados en la generación de productos cartográficos y se derivan del documento “Especificaciones técnicas para la realización de cartografía topográfica a cualquier escala (primer borrador)” publicado en mayo de 2006 por el Instituto Geográfico Militar.

8.1 Escala y equidistancia entre curvas de nivel (intervalo de curva)

La equidistancia de curvas será definida básicamente por la escala del mapa o representación cartográfica. Así, para la cartografía de series nacionales el intervalo de curva será definido por el Instituto Geográfico Militar (IGM), y para cartografía a escalas mayores o iguales a 1:10.000 el mismo será equivalente a la milésima parte del denominador de la escala, en metros.

La equidistancia entre curvas de nivel, para series nacionales, será aquella que el organismo rector la formule y para cartografía con escalas iguales o mayores a 1:10000 será:

$$CI = \frac{M}{1000}(m) \quad (1)$$

En donde:

CI = intervalo de curva (Contour Interval)

M = Denominador de la escala

8.2 Origen para las alturas

El origen de altitudes niveladas será el nivel medio del mar determinado para una época determinada en el mareógrafo de La Libertad (Provincia del Guayas). La referencia de origen se materializa en una marca geodésica fundamental localizada en las proximidades del mencionado mareógrafo, y también en las referencias de nivel de primero, segundo y tercer orden materializadas en las principales vías de comunicación terrestre del territorio nacional, y cuya altura ha sido propagada por el Instituto Geográfico Militar desde la referencia de origen (datum vertical) mediante la realización de nivelación geométrica y/o trigonométrica.

No obstante, se debe considerar que, en muchos casos, y dependiendo de la escala de la cartografía a ser generada y de las aplicaciones dadas a la misma, otro tipo de alturas y de superficies de referencia son utilizadas. Este es el caso por ejemplo de los productos cartográficos para los cuales las alturas se refieren a un elipsoide de referencia y son determinadas exclusivamente mediante posicionamiento GNSS, técnicas basadas en tecnología radar, LIDAR, microondas, etc.

En este sentido, en algunos casos, también son utilizadas alturas referidas a superficies equipotenciales asociadas a geoides/cuasigeoides locales o Modelos Globales de Geopotencial, y que son obtenidas mediante la combinación ($h - N$) de alturas elipsoidales (h) provenientes de posicionamiento GNSS y de alturas geoidales (N) derivadas de dichos modelos. En estos casos, se debe considerar las precisiones nominales de los modelos (locales y/o globales), con el objeto de determinar si las mismas son adecuadas y se ajustan a los requerimientos en términos de la exactitud posicional esperada en el producto cartográfico (relacionada con la escala). Errores de omisión y comisión propios de los modelos globales, generan incertezas en la determinación de alturas geoidales y/o de anomalías de alturas que pueden alcanzar dimensiones métricas.

Adicionalmente se debe mencionar que, obediendo a los estándares establecidos a través de SIRGAS (Sistema de Referencia Geodésico para Las Américas) por la Asociación Internacional de Geodesia (IAG,2015), en relación al establecimiento de un Sistema de Referencia Vertical Global (SVRG), las alturas determinadas para la Red de Control Vertical de Ecuador (RCVE), deberán ser obtenidas en función del cálculo de números geopotenciales y estar vinculadas a un Datum Vertical Global (DVG) (materializado por una superficie equipotencial del campo de gravedad terrestre y con valor de geopotencial $W_0 = 62636859.4 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$) (Ihde et al., 2017).

El Sistema Vertical de Referencia de Ecuador (SVRE) deberá, por tanto, adaptarse a los preceptos establecidos por la IAG y divulgados en América del Sur por SIRGAS. De esta forma, el establecimiento del datum vertical para la RCVE, deberá basarse en el cálculo del geopotencial (W_0^i) en una o más estaciones fundamentales (i.e. estaciones IHRF – *International Height Reference Frame*).

Los trabajos orientados al establecimiento del nuevo Datum vertical están en etapa de realización, y a futuro las alturas de carácter físico determinadas para la Red de Control Vertical de Ecuador, deberán referirse al mismo, con lo cual la componente vertical del Marco de Referencia Geodésico Nacional estará vinculándose al Sistema de Referencia de Alturas Internacional (IHRS – *International Height Reference System*).

8.3 Precisión y exactitud en curvas de nivel

Las curvas de nivel en terreno sin influencia de vegetación, se trazará con una precisión tal, que el noventa por ciento (90%) de las cotas obtenidas por interpolación de aquellas, no diferirán de las verdaderas en más de la mitad de la equidistancia.

En las zonas con influencia de vegetación, las curvas de nivel se trazarán con línea discontinua, aceptándose entonces una tolerancia igual a la equidistancia que se lograría sin considerar la influencia de vegetación, por métodos terrestres, si es preciso.

Cabe destacar que la precisión descrita en este apartado, solo considera parámetros para el trazo de la curva (parámetros netamente visuales y estéticos). Debido a la definición intrínseca de curva de nivel (Línea formada por los puntos del terreno que se encuentran a la misma altitud. REA, 2003), esta no puede ser identificada en territorio como un punto fiducial, por lo tanto, no puede ser medida como tal y mucho menos valorada para definir su exactitud (no fiscalizable).

8.4 Precisiones finales altimétricas para cartografía analógica o impresa

Las elevaciones del 90% de los puntos acotados en un mapa impreso, no diferirá de la verdadera en más de $\frac{1}{4}$ del valor del intervalo de curva de nivel, el 5% restante nunca excederá del valor del $\frac{1}{2}$ del intervalo de curva de nivel. Las elevaciones del 90% de los puntos, cuyas cotas se obtengan por interpolación entre curvas de nivel, no diferirán de las verdaderas en más de $\frac{1}{2}$ del intervalo de curva de nivel. El 10% restante no podrá exceder el valor de la equidistancia (IGM, 2006). Para cumplir con estas precisiones, se recomienda utilizar restitución fotogramétrica o métodos similares.

Sin embargo, estos criterios pertenecen a cartografía analógica, por lo que el IGM en su búsqueda de permanecer en la vanguardia del avance tecnológico y la evolución de

metodologías para la obtención de información geográfica, pone a disposición el presente documento que considera la evolución de cartografía analógica a una cartografía digital.

9. CONTROL DE LA EXACTITUD POSICIONAL VERTICAL PARA PRODUCTOS CARTOGRÁFICOS DIGITALES

De forma homóloga a los procedimientos seguidos para la evaluación de la exactitud posicional en la componente horizontal, para el caso vertical se utiliza una muestra de puntos con el objetivo de analizar la calidad de los productos cartográficos mediante un método estadístico. El tratamiento estadístico se realiza en base a errores lineales y circulares de la muestra, para luego extrapolarlo a la población (González, 1985).

La precisión vertical media en los productos cartográficos, puede ser determinada considerando los errores aleatorios involucrados en su generación. De esta forma es factible el uso de la función de densidad normal o de Gauss:

$$\rho(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_x^2}} e^{-\left(\frac{x^2}{2\sigma_x^2}\right)}; -\infty \leq x \leq \infty \quad (2)$$

En donde:

$\rho(x)$ = probabilidad de que los puntos se encuentren correctamente posicionados

x = valor correspondiente al producto cartográfico menos valor levantado o conocido

σ_x = desviación estándar de x

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_1^n x^2}{n-1}} \quad (3)$$

Siendo n el número de puntos evaluados.

De esta forma, la Norma de Precisión Cartográfica (NPC), que establece una precisión del al menos $\frac{1}{4}$ del intervalo de curva de nivel, será evaluada de acuerdo a la distribución de densidad de Gauss conforme la ecuación (4) (González, 1985).

$$\int \rho(x) dx = 0.90 \quad (4)$$

Que representa el 90% de la superficie bajo la curva de distribución normal (Ilustración 1). Considerando un nivel de confianza del 90%, para una distribución normal con media $\mu = 0$ y desviación estándar $\sigma = 1$, el intervalo de confianza $[-z, +z]$ será $[-1.645, 1.645]$. Para este nivel de confianza corresponde $\alpha =$ nivel de significancia = 10% ($\alpha/2 = 5\%$) (González, 1985).

$$z = \frac{\chi - \mu}{\sigma} \quad (5)$$

Que, con el intervalo de confianza considerado, puede escribirse como:

$$1.645 = \frac{\chi - \mu}{\sigma} \quad (6)$$

La desviación estándar esperada para una distribución normal particular tendrá la forma:

$$\sigma = \frac{\chi - \mu}{1.645} \quad (7)$$

De esta forma, considerando μ (media) = 0, y la precisión mínima requerida (cuarto del intervalo de curva) para una cartografía E: 1:1000, con intervalo de curva de 1m, tenemos:

$$\sigma = \frac{0.25}{1.645} = 0.152 \quad (8)$$

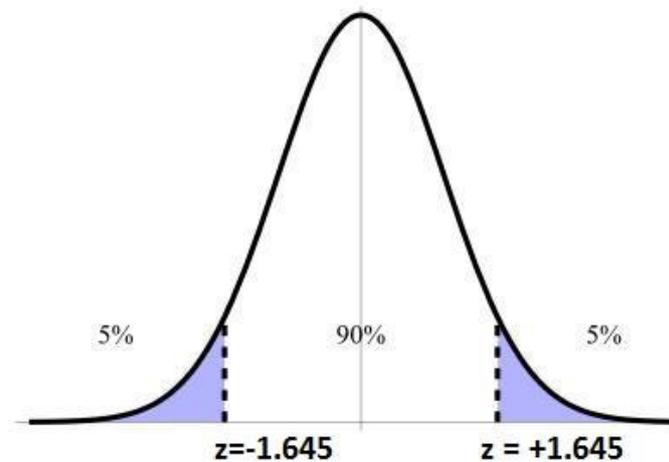


Ilustración 1: Distribución normal con nivel de confianza del 90%

9.1 Exactitud vertical

Para la evaluación de la exactitud vertical en productos cartográficos y en referencias de nivel, se acude al concepto de Error Medio Cuadrático (*Root Mean Square Error - RMSE*) (9), tomando como referencia lo descrito por la (NSSDA, 1998) Apéndice 3-A.

$$RMSE_z = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (z_{dato\ i} - z_{chequeo\ i})^2}{n}} \quad (9)$$

En donde:

$z_{\text{dato } i}$ es la coordenada vertical del punto de chequeo i para el conjunto de datos

$z_{\text{chequeo } i}$ es la coordenada vertical del punto de chequeo i para una fuente de datos independiente y de alta exactitud.

n : número de puntos a ser evaluados

i : es un entero de 1 a n

Se asume que los errores sistemáticos han sido eliminados de la mejor forma posible. Si los errores en vertical tienen una distribución normal, el factor 1.960 es aplicado para calcular el error lineal al 95% de nivel de confianza. Por tanto, la exactitud vertical reportada de acuerdo a la NSSDA debe ser calculada por la ecuación:

$$\text{Exactitud}_z = 1.960 * RMSE_z \quad (10)$$

9.2 Exactitud vertical según la National Standard for Spatial Data Accuracy (NSSDA)

National Standard for Spatial Data Accuracy (NSSDA) usa el error medio cuadrático (RMSE) para estimar la exactitud posicional. RMSE es la raíz cuadrada del promedio de un conjunto de diferencias cuadradas entre coordenadas de los datos y coordenadas provenientes de una fuente de alta exactitud para los mismos puntos (Federal Geographical Data Committee, 1998).

La exactitud es reportada al 95% de confianza, lo cual significa que el 95% de las posiciones del conjunto de datos tendrán un error con respecto a las posiciones reales que es igual o menor al valor de exactitud reportado (esperado). Los valores de exactitud reflejan todas las incertezas, incluyendo aquellas introducidas por las coordenadas de control geodésico, compilación, y cálculos finales.

La exactitud vertical debe ser evaluada comparando elevaciones del conjunto de datos con alturas de los mismos puntos determinadas desde una fuente independiente y de alta exactitud (Federal Geographical Data Committee, 1998).

Un mínimo de 20 puntos debe ser testeado, los cuales deben estar distribuidos de tal forma que representen el área de interés y la distribución de errores en el conjunto de datos. Cuando 20 puntos son evaluados, el nivel de confianza de 95% permite que un punto no cumpla con el umbral definido en las especificaciones del producto (Federal Geographical Data Committee, 1998).

Si menos de 20 puntos de evaluación pueden ser definidos, una alternativa puede ser evaluar la exactitud del conjunto de datos. *Spatial Data Transfer Standard* (STDS) (American National Standards Institute, 1998) identifica estos métodos alternativos para determinar exactitud posicional: Estimación deductiva, evidencia interna, comparación con la fuente

Para un conjunto de datos que abarquen un área rectangular, los puntos de chequeo deben estar distribuidos de tal forma que estén espaciados por intervalos de al menos 10% de la longitud de la diagonal que cruza el área correspondiente al conjunto de datos, y al menos 20% de los puntos deben estar localizados en cada cuadrante del área del conjunto de datos (Federal Geographical Data Committee, 1998).

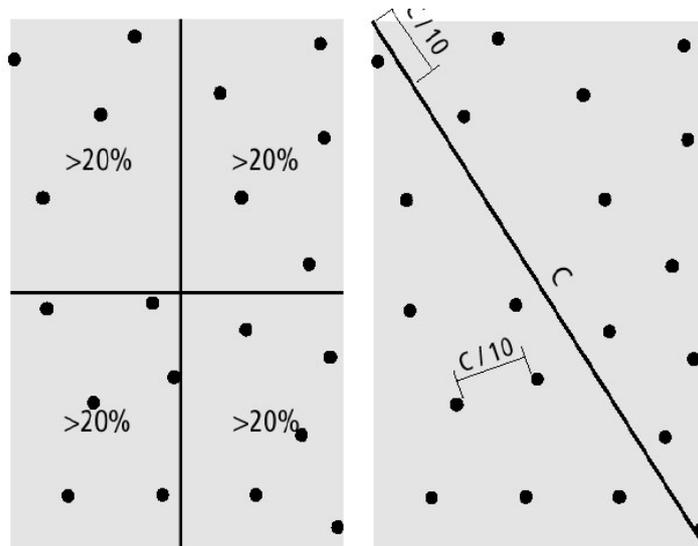


Ilustración 2: Distribución óptima de puntos de un área rectangular

Fuente: Cialek et al. (1999)

9.3 Relación entre NSSDA y RMSE (vertical)

Si el error vertical se encuentra normalmente distribuido, $RMSE_z$ puede ser determinado desde la exactitud ($EXACTITUD_z$) de acuerdo a NSSDA:

$$RMSE_z = \frac{EXACTITUD_z}{1.960} \quad (11)$$

9.4 Relación entre NSSDA y National Map Accuracy Standards - NMAS (vertical) para determinar el máximo permisible en exactitud posicional

El Apéndice 3-A de la (NSSDA, 1998), menciona que: la National Map Accuracy Standards (NMAS)(U.S. Bureau of the Budget, 1947) especifica que el 90% de los puntos evaluados deben entrar dentro de la tolerancia especificada. Por lo tanto, *la tolerancia vertical máxima permitida debe ser la mitad del intervalo de curva de nivel, para todos los intervalos de curva.*

Si los errores en vertical obedecen a una distribución normal, el factor 1.6449 es aplicado para calcular la exactitud vertical para el 90% de nivel de confianza (Greenwalt & Schultz, 1968). De

esta forma, VMAS (*Vertical Map Accuracy Standard*) basado en NMSA es estimada mediante la siguiente ecuación:

$$VMAS = 1.645 * RMSE_z \quad (12)$$

VMAS puede ser convertido en EXACTITUD_z de acuerdo con NSSDA conforme la ecuación:

$$EXACTITUD_z = \frac{1.9600}{1.6449} * VMAS = 1.1916 * VMAS \quad (13)$$

Por tanto, considerando la exactitud vertical reportada de acuerdo a NSSDA (VMAS = 1/2 del intervalo de curva), esta poseerá un **MÁXIMO PERMISIBLE** en función del intervalo de curva de una escala específica:

$$EXACTITUD_z = \frac{1.1916}{2} * CI$$

$$EXACTITUD_z = 0.5958 * CI \quad (14)$$

En donde:

CI = intervalo de curva (*Contour Interval*)

10. EVALUACIÓN DE LA EXACTITUD POSICIONAL VERTICAL PARA PRODUCTOS CARTOGRÁFICOS

Como ya fue mencionado con anterioridad, para estimar la exactitud posicional, se utilizó el RMSE (error medio cuadrático) (9), conforme lo recomienda el NSSDA y permite el cálculo del error de la muestra con un mínimo de 20 puntos con un nivel de confianza de 90%.

Por otra parte, antes de evaluar la exactitud posicional vertical será imperativo que primero se defina la referencia con la cual se realizará el análisis, es decir detallar si la vertical será evaluada como una altura elipsoidal, “Ortométrica” calculada (especificar modelo utilizado) o altura nivelada.

Finalmente, los criterios estadísticos de evaluación considerados anteriormente se mantienen y serán contrastados con la exactitud máxima tolerable, la cual se encuentra estrechamente relacionada con la escala de los productos geodésicos y/o cartográficos que se derivarán de los mismos, siendo estos;

10.1. Productos vectoriales

En este apartado se considerará todos aquellos productos y magnitudes vectoriales como cartografía digital, puntos de apoyo fotogramétrico y puntos de control topográficos. La exactitud posicional vertical para este tipo de productos será calculada en función del RMSE y de los parámetros correspondientes para una distribución normal de residuales al 95% de nivel de confianza por la ecuación (10), mientras el límite permisible de dicha exactitud será determinado por la Relación entre NSSDA y NMA (ecuación 14).

10.2. Productos Raster

En este apartado se considerará todos aquellos productos en formato Ráster, como Ortofotos, imágenes satelitales y Modelos Digitales del Terreno (MDT). La exactitud posicional vertical para este tipo de productos será calculada en función del RMSE y de los parámetros correspondientes para una distribución normal de residuales al 95% de nivel de confianza conforme la ecuación (10), mientras el límite permisible de dicha exactitud será determinado por los valores definidos por la tabla 1, misma que se deriva de la Tabla 6 del Apéndice B del documento “Estándares de precisión ASPRS para Digital Datos geoespaciales” (ASPRS, 2014).

Tabla 1: Ejemplos de calidad vertical para datos de elevación digital para Raster

| Clase de datos verticales | Escala de producto 1:XXX | Intervalo de Curva (m) | RMSEz en terrenos sin vegetación (95% NDC) (cm) | RMSEz en terrenos con vegetación (95% NDC) (cm) |
|---------------------------|--------------------------|------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| VII | 1000 | 1 | 65.3 | 98 |
| VIII | 2000 | 2 | 130.6 | 196 |
| IX | 3000 | 3 | 195.9 | 294 |
| IX | 5000 | 5 | 326.5 | 490 |
| X | 10000 | 10 | 653 | 980 |
| X | 25000 | 25 | 1638.5 | 2450 |
| X | 50000 | 50 | 3265 | 4900 |
| X | 100000 | 100 | 6530 | 9800 |
| X | 250000 | 250 | 16325 | 24500 |

Fuente: American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS)

La Tabla 1 proporciona ejemplos de precisión vertical y otros criterios de calidad según la ASPRS para diez clases de precisión vertical (Para escalas 1:1000 e inferiores, la calidad del producto está definida desde la clase VII en adelante), cada una con un intervalo de curva apropiado y respaldado por los valores RMSEz definidos por la NSSDA, para usuarios que pueden requerir productos a diferentes escalas.

11. MUESTREO PARA TOMA DE PUNTOS EN ORTOFOTOS Y MDT

La verificación de la exactitud posicional se realizará a través de puntos de muestro a todo el proyecto de ortofoto verdadera, mediante el levantamiento en campo de puntos fotoidentificables que será previamente planificados distribuidos de forma homogénea sobre el producto final presentado por el Contratista. Se realizará la evaluación de un rango de 20 (mínimo para estadístico NSSDA) hasta 30 (depende planificación y acceso terrestre) puntos de control distribuidos de forma homogénea a lo largo de todo el proyecto. Para el caso de la presencia de poblados dispersos dentro del proyecto, se contemplará el posicionamiento del 5-10% de puntos de control por cada poblado disperso de ser necesario y si la planificación así lo considere.

Para el posicionamiento se utilizará receptores GNSS de doble frecuencia, por métodos Estático, Estático Rápido y/o métodos NTRIP, se considerarán las intersecciones de aceras con un contraste alto en la ortofoto, bordillos o canales claramente definidos; así como también, vértices de viviendas, elementos recomendables dentro de la escala del proyecto.

El método para realizar la ubicación de los puntos de control, conforme al reporte geodésico levando en campo. Se realizará el acercamiento al objeto identificado, hasta distinguir el límite del pixel y ubicar la posición que corresponderá al centro del mismo, hasta determinar la coordenada en el producto presentada por la empresa. El tiempo de recepción de cada sesión dependerá de la distancia de la línea base y se calculará en función del tiempo de recepción de cada sesión de acuerdo a la distancia de la línea base según lo señala el IGM.

12. REFERENCIAS

- American National Standards Institute. (1998). *Spatial Data Transfer Standard (SDTS)*.
- American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS), 2014. Accuracy Standards for Digital Geospatial Data. Edición 2014
- Greenwalt, C. R., & Schultz, M. E. (1968). *Principles and Error Theory and Cartographic Applications, ACIC Technical Report No. 96*.
- González German, 1985. Métodos Estadísticos y principios de diseño experimental, segunda Edición.
- Instituto Geográfico Militar (2006), Especificaciones Técnicas generales para la realización de cartografía topográfica a cualquier escala. IGMC-PG-N-ET-01. Disponible en: <http://www.igm.gov.ec/work/files/downloads/especcarto9.html>
- National Standard for Spatial Data Accuracy (NSSDA). (1998). Geospatial Positioning Accuracy Standards Part3 : *National Spatial Data Infrastructure*, 28. <http://www.fgdc.gov/standards/projects/FGDC-standards-projects/accuracy/part3/chapter3>
- Ilde, J., Sánchez, L., Barzaghi, R., Drewes, H., Foerste, C., Gruber, T., Liebsch, G., Marti, U., Pail, R., & Sideris, M. (2017). Definition and Proposed Realization of the International Height Reference System (IHRM). *Surveys in Geophysics*. <https://doi.org/10.1007/s10712-017-9409-3>
- Real Academia Española (RAE) (2003), Diccionario y Definiciones. Disponible en: <https://www.rae.es/>
- U.S. Bureau of the Budget. (1947). *United States National Map Accuracy Standards*.