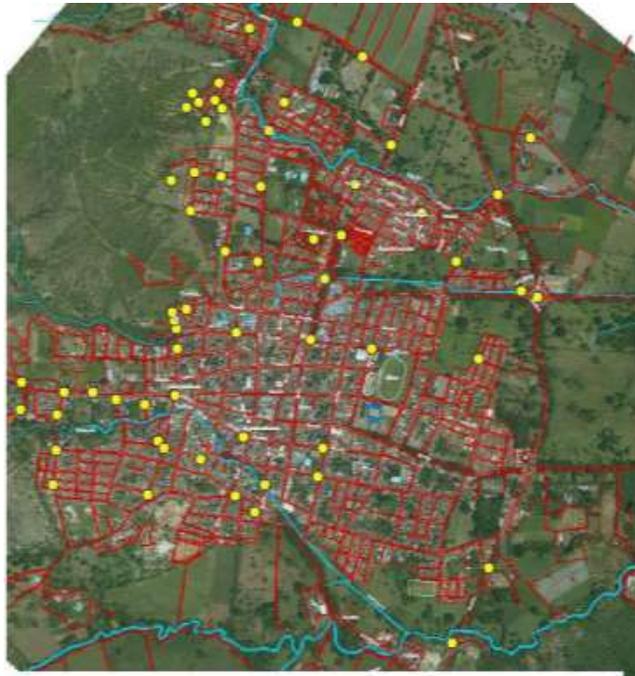


CONVENIO INTERADMINISTRATIVO N° 0205 DE 2017

CVC – UNIVALLE

MUNICIPIOS DE BOLIVAR, ROLDANILLO Y VERSALLES



Estudios topográficos para la zonificación de amenazas por Inundación y Movimientos en Masa de la zona urbana del Municipio de Roldanillo

INFORME TÉCNICO



Santiago de Cali, octubre de 2018



CONVENIO INTERADMINISTRATIVO N°0205
CVC – UNIVALLE
MUNICIPIOS DE BOLIVAR, ROLDANILLO Y VERSALLES



PRESENTACIÓN

Para la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca, CVC, es una gran satisfacción aportar a los municipios de Bolívar, Roldanillo y Versalles, la evaluación de la amenaza, vulnerabilidad y escenarios de afectación o daño en el componente urbano municipal, en cumplimiento de la función dada por la Ley 1523 de 2012 sobre el apoyo a los municipios en el conocimiento del riesgo.

Conocedores de la importancia y responsabilidad que reviste abordar el tema del conocimiento de las amenazas y los riesgos, la CVC llevó a cabo una alianza con el Observatorio Sismológico y Geofísico del Suroccidente, OSSO, adscrito a la Universidad del Valle, con el fin de obtener los mejores resultados en estas evaluaciones. De igual forma, es necesario reconocer el aporte, contribución y compromiso de las administraciones municipales y sus propios habitantes, a lo largo de la ejecución de este estudio. Otro objetivo es fortalecer el conocimiento que tenemos de nuestro entorno para tener certeza y articular una adecuada planificación y ocupación de nuestros territorios.

Los estudios entregados son parte fundamental de la información que se requiere para que cada municipio formule su Ordenamiento Territorial de segunda generación y son evaluaciones que dan soporte para la reducción y la elaboración de planes de emergencia y contingencia.

La presente evaluación de las amenazas y riesgos deben estructuralmente permitirle al municipio reglamentar el uso del suelo en el componente urbano, de tal manera que, como lo define la política de gestión del riesgo y en esencia la constitución colombiana, se logre avanzar hacia un desarrollo sostenible, que ofrezca seguridad para la vida de los habitantes, sus bienes y medios de subsistencia, así como a toda la infraestructura del municipio.

Finalmente, la CVC con estas evaluaciones, a través de la Universidad, espera contribuir en la formación y fortalecimiento de la capacidad profesional de la región en este tipo de estudios.

Rubén Darío Mataron Muñoz
Director General
CVC

AGRADECIMIENTOS

A la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca y la Dirección Ambiental Regional BRUT, a la Secretarías de Planeación e Infraestructura Física del municipio de Roldanillo por la información suministrada de lugares críticos de inundación y movimientos en masa de la zona urbana del municipio de Roldanillo en el marco del Convenio Interadministrativo N°0205 de 2017 entre la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca -CVC y La Universidad de Valle, el cual tiene como objeto *“Aunar Esfuerzos Técnicos y Recursos Económicos para la Elaboración de los Estudios de Zonificación de Amenaza y Vulnerabilidad y Escenarios de Afectación para las Áreas Urbanas de los Municipios de Bolívar, Versalles y Roldanillo en el Valle del Cauca”*.

CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DEL VALLE DEL CAUCA – CVC

DIRECTIVOS

RUBÉN DARÍO MATERÓN MUÑOZ

Director General

MARÍA CRISTINA VALENCIA RODRÍGUEZ

Secretaria General (C)

HÉCTOR FABIO ARISTIZABAL RODRIGUEZ

Director Técnico Ambiental (C)

PAULA ANDREA SOTO QUINTERO

Directora Territorial – Dirección Ambiental Regional BRUT

SUPERVISIÓN

Yuncely Gimena Bastidas B

Ingeniería Civil

Especialista en Diseño Estructural

Líder del proyecto 5001

Arelix Andrea Ordoñez Franco

Ingeniería Ambiental

Supervisora del Convenio Interadministrativo N° 0205 de 2017 CVC-Univalle

EQUIPO TÉCNICO

Omar Alberto Chaves M

Ingeniero Civil

Alejandra María Gómez

Ingeniera Civil

Doctora (Ph. D.) en Geotecnia

María Victoria Cross Garcés

Ingeniera Agrónoma

Especialización en Educación Ambiental

UNIVERSIDAD DEL VALLE

DIRECTIVOS

EDAGAR VARELA BARRIOS

Rector

LILIANA ARIAS CASTILLO

Vicerrectora Académica

INÉS MARÍA ULLOA VILLEGAS

Vicerrectora Administrativa

CLAUDIA SANTAMARÍA GAITÁN

Vicerrector de Bienestar Universitario

JAIME RICARDO CANTERA KINTZ

Vicerrector de Investigación

ANTONIO JOSÉ ECHEVERRY PÉREZ

Secretario General

GLADYS STELLA LÓPEZ JIMÉNEZ

Decana - Facultad de Humanidades

EQUIPO TÉCNICO

ELKIN DE JESÚS SALCEDO HURTADO

Director - Observatorio Sismológico y Geofísico del Sur Occidente Colombiano - OSSO
Doctor (Ph. D.) en Física-Matemáticas

GRUPO DE TOPOGRAFÍA

Jhon Jairo Barona

Doctor en Ing Geográfica
Coordinador

Evlin Mireya López

Ing. Topográfica

Alexander Pretel

Est de Ing. Topográfica

GRUPO DE CARTOGRAFÍA Y SIG

Jhon Jairo Barona

Doctor en Ing Geográfica
Coordinador

Danny Alexander Cocuñame Ricardo

Geógrafo

Vanessa García Cardona

Ing. Topográfica

María Camila Pomeo

Est. Ingeniería Topográfica

Carlos Mauricio Mosquera Pérez

Est. Ingeniería Topográfica

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCION.....	8
1. TOPOGRAFÍA DEL MUNICIPIO DE ROLDANILLO	10
1.1. SISTEMAS Y MARCOS DE REFERENCIA	11
1.2. LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO CON ESTACIÓN TOTAL	15
1.3. TOPO BATIMETRÍA	18
2. METODOLOGÍA.....	20
2.1. ANÁLISIS DE METODOLOGÍAS DE ZONIFICACIÓN DE AMENAZAS POR MOVIMIENTOS EN MASA E INUNDACIONES	21
2.2. ANÁLISIS DE RIESGOS	21
2.3. EVALUACIÓN DE RIESGOS	22
3. DEFINICIÓN DE PRODUCTOS DE INFORMACIÓN GEOMÁTICA PRIMARIA	22
3.1. ANÁLISIS DE ESTÁNDARES DE CALIDAD DE CADA PRODUCTO.....	23
3.1.1. CARTOGRAFÍA BÁSICA DIGITAL	23
3.1.2. CONSTRUCCIÓN DE MODELOS DIGITALES DEL TERRENO	25
3.1.3. MUESTREO	27
4. DISEÑO DE PROCEDIMIENTOS	31
4.1. CONSTRUCCIÓN REDES DE CONTROL GNSS.....	31
4.1.1. MUESTREO	32
4.1.2. TOPOGRAFÍA CONVENCIONAL.....	33
5. TRABAJO DE CAMPO	34
6. RESULTADOS AMARRE A LA RED GEODÉSICA NACIONAL.....	34
6.1. EVALUACIÓN DE CALIDAD DE UN MODELO DE ELEVACIÓN DEL TERRENO	35
6.2. BATIMETRÍA.....	38
CONCLUSIONES.....	42
REFERENCIAS	43

LISTA DE TABLAS

TABLA 2.1. RESUMEN REQUERIMIENTOS SEGÚN METODOLOGÍA	22
TABLA 3.1. RESOLUCIÓN ESPACIAL EXPRESADA EN GSD	24
TABLA 3.2. SISTEMA DE COORDENADAS GEOGRÁFICAS MAGNA	24
TABLA 3.3. ORÍGENES DE COORDENADAS GAUSS KRUGER	24
TABLA 2.5 EXACTITUD ABSOLUTA DE POSICIÓN POR ESCALAS.....	25
TABLA 3.5. NIVEL DE TOLERANCIA POR ESCALA	25
TABLA 3.6. PRECISIÓN SEGÚN EL TERRENO	26
TABLA 3.7. NUMERO RECOMENDADO DE PUNTOS CHEQUEO BASADOS EN EL ÁREA.....	30
TABLA 6.1. ESTADÍSTICOS PARA DETERMINAR DISTRIBUCIÓN NORMAL DE DATOS.....	37

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1. NIVELACIÓN TRIGONOMÉTRICA, SITUACIONES	15
FIGURA 1.2. TIPOS DE POLIGONAL	16
FIGURA 1.3. LEVANTAMIENTO BATIMÉTRICO.....	19
FIGURA 1.4. ESQUEMA BATIMETRÍA DE RIO POR ECOSONDA	20
FIGURA 2.1. ESQUEMA METODOLÓGICO	21
FIGURA 3.1. MUESTREO ALEATORIO SIMPLE.....	28
FIGURA 3.2. MUESTREO ALEATORIO ESTRATIFICADO	29
FIGURA 3.3. MUESTREO SISTEMÁTICO	29
FIGURA 3.4. MUESTREO ANIDADO	30
FIGURA 4.1. MATERIALIZACIÓN PUNTOS DE CONTROL.....	32
FIGURA 4.2. GEORREFERENCIACIÓN PUNTOS DE CONTROL	32
FIGURA 6.1. DISEÑO DE LA RED DE AMARRE A MAGNA MUNICIPIO DE ROLDANILLO	34
FIGURA 6.2. MUESTRA DE DATOS PARA VALIDACIÓN DTM ROLDANILLO	35
FIGURA 6.3. DISTRIBUCIÓN NORMAL DEL ERROR ROLDANILLO	37
FIGURA 6.4. TOPO BATIMETRÍA RIO ROLDANILLO	38
FIGURA 6.5. TOPO BATIMETRÍA ZANJÓN DE LOS MUDOS	38
FIGURA 6.6. TOPO BATIMETRÍA RÍO EL REY	39
FIGURA 6.7. PERFILES LONGITUDINALES CAUCES MUNICIPIO ROLDANILLO	40
FIGURA 6.8. GENERACIÓN DE DTM Y PRODUCCIÓN DE BATIMETRÍA ROLDANILLO	41

INTRODUCCION

Generar la información primaria para estudios de zonificación por movimientos en masa e Inundación, necesita del conocimiento de las metodologías empleadas para dichas actividades, con el fin de identificar los requerimientos de los diferentes componentes temáticos involucrados, y dar como resultado un listado de productos y especificaciones técnicas para determinar el diseño de la metodología que se debe emplear para la adquisición, procesamiento, verificación y entrega de la información. El diseño involucra procesos como validación de información adquirida, captura de datos con diferente tipo de tecnología, topografía convencional o GPS, chequeo de precisión, edición y generación de la información.

Este apartado está orientado a dar soporte técnico a los procesos de recolección de información primaria en los levantamientos de información topográfica, cartografía base e insumos de topografía y geodesia para dar apoyo a los grupos multidisciplinarios que participan de la zonificación de amenazas por movimientos en masa e inundaciones en un contexto urbano.

OBJETIVOS

Generales

Diseñar y aplicar las metodologías de captura de datos en campo para la generación de insumos en el proceso de zonificación de amenazas por movimientos en masa e inundaciones en un contexto urbano

Específicos

- Caracterizar los tipos de información primaria requerida en este tipo de estudios generada desde la Ingeniería topográfica.
- Construir los procesos de adquisición de información acorde con los requerimientos de cada componente temática del proyecto

1. TOPOGRAFÍA DEL MUNICIPIO DE ROLDANILLO

Es un municipio de Colombia desde 1892, se encuentra al norte del valle del cauca y a 149 km de Cali, este es un municipio de arquitectura colonial ya que posee construcciones como la ermita, la capilla de Santa Rita y además el museo rayo, que el diseño está basado en la arquitectura maya, además este museo solo presenta las obras de su fundador y otros artistas latinoamericanos.

Poseen cultivos de maíz, café y azúcar, que representa el 65% de sus ingresos y una muy buena infraestructura hotelera desarrollada a partir de las actividades de parapente. Presenta un relieve quebrado a escarpado, contiene cenizas volcánicas depositadas sobre arcillas, provenientes de la alteración de la diabasa. En general son suelos profundos, bien drenados, y moderadamente erosionados (Alcaldía-Roldanillo, 2018).

1.1. SISTEMAS Y MARCOS DE REFERENCIA

Un sistema de referencia es el conjunto de conceptos teóricos adecuadamente modelados que permiten definir, la orientación, ubicación y escala de tres ejes coordenados (X, Y, Z). Como un sistema de referencia es un modelo, éste es materializado mediante puntos reales cuyas coordenadas son determinadas sobre el sistema de referencia dado, dicho conjunto de puntos se denomina marco de referencia. Si el origen de coordenadas del sistema (X=0, Y=0, Z=0) es el centro de masas terrestre, que se define como un Sistema Geocéntrico de Referencia o Sistema Coordenado Geocéntrico, si dicho origen está desplazado del geocentro, se conoce como Sistema Geodésico Local.

Las posiciones (X, Y, Z) se expresan en coordenadas curvilíneas latitud (ϕ) y longitud (λ), las cuales requieren de la introducción de un elipsoide de referencia. El origen de coordenadas (X=0, Y=0, Z=0) coincide con el centro geométrico del elipsoide, el eje Z con el eje menor del elipsoide, el eje X con la intersección del plano ecuatorial y del meridiano de referencia del elipsoide y el eje Y forma un sistema coordenado de mano derecha. La orientación y ubicación del elipsoide asociado a un sistema coordenado (X, Y, Z) se conoce como Datum Geodésico; si este es geocéntrico se tiene un Datum Geodésico Geocéntrico o Global, si es local se tendrá un Datum Geodésico Local. Estos últimos se conocen también como Datum Horizontales ya que sus coordenadas (ϕ , λ) se definen independientemente de la altura (H). Mientras que la latitud (ϕ) y la longitud (λ) se refieren al elipsoide, la altura (H) se define sobre una superficie de referencia (el nivel medio del mar) que no tiene relación alguna con el elipsoide. Los datum geocéntricos, por el contrario, son tridimensionales, éstos permiten definir las tres coordenadas de un punto con respecto a la misma superficie de referencia (el elipsoide), en este caso la tercera coordenada se conoce como altura geodésica o elipsoidal (h). (IGAC, 2004).

- **Sistema Internacional de Referencia ITRS (International Terrestrial Reference System):** es establecido y mantenido por el IERS (International Earth Rotation and Reference Systems Service). Este se define con origen en el centro y masa terrestre, el eje X está orientado al Meridiano de Greenwich Convencional determinado por la IERS y llamado Reference Meridian (IRM) o Greenwich Mean Origin (GMO), el eje Z está orientado al polo definido por el Conventional International Origin (CIO) y el Y es perpendicular a estos dos sistemas. La escala está definida en un marco geocéntrico y la

orientación esta forzada a no tener residuales en la rotación global con respecto a la corteza terrestre. (IGAC, 2004)

- **Marco de Internacional Referencia Terrestre ITRF (International Terrestrial Reference Frame):** es el marco de referencia del ITRS, el cual está formado por las coordenadas cartesianas geométricas (X, Y, Z) y las velocidades (V_x, V_y, V_z), de un conjunto de estaciones observadas mediante técnicas geodésicas espaciales de alta precisión. Debido al movimiento de las placas tectónicas y su deformación que alteran las coordenadas de las de sus estaciones hace que las velocidades sean incluidas, de tal forma que una observación instantánea en la superficie de la tierra, como las coordenadas ITRF difiere del sistema de referencia satelital, estas deben ser trasladadas en el tiempo. Esa dependencia hace que la ITFR notifique la época para la cual la posición de sus estaciones es vigente.

Traslado de las coordenadas fiduciales desde la época de referencia a la época de observación. Es decir, las coordenadas asociadas a SIRGAS95 deben trasladarse desde 1995.4 al día en que se hace el levantamiento GNSS, por ejemplo “2018.0.” dicho traslado se hace mediante:

$$\begin{aligned}X_{(t)} &= X_{(t_0)} + (t - t_0) * V_x \\Y_{(t)} &= Y_{(t_0)} + (t - t_0) * V_y \\Z_{(t)} &= Z_{(t_0)} + (t - t_0) * V_z\end{aligned}$$

Donde,

$X_{(t)}, Y_{(t)}, Z_{(t)}$ Son las coordenadas de la época deseada

$X_{(t_0)}, Y_{(t_0)}, Z_{(t_0)}$ Son las coordenadas de la época de referencia

$(t - t_0)$ Es el intervalo de tiempo Transcurrido entre la realización del sistema y el levantamiento GNSS

V_x, V_y, V_z Son las velocidades de las estaciones de referencia

- **Sistema Referencia Geocéntrico para las Américas -SIRGAS-:** es una extensión del ITRF para las Américas, está conformada por una red de 180 estaciones geodésicas de alta precisión con un cubrimiento homogéneo de tal forma que las redes locales estén integradas al ITRF. El datum geodésico está definido por parámetro del geoide GRS80 (Geodetic Reference System, 1980), orientado según los ejes coordenados del sistema de referencia SIRGAS, equivalente al ITRF94 (IGAC, 2004).

La red GPS permanente está compuesta por más de 40 puntos de rastreo continuo, cuya información es procesada semanalmente por DGFI (Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut) con Centro de Procesamiento Regional (RNAAC: Regional Network Associate Analysis Center) del Servicio Internacional GPS (IGS: International GPS Service), que garantiza su referencia permanente con el sistema geocéntrico global (IGAC, 2004).

- **Marco de Geocéntrico Nacional de Referencia, MAGNA:** la Red Básica GPS MAGNA por estar referida a SIRGAS se denomina MAGNA-SIRGAS y el datum geodésico

asociado corresponde con el elipsoide GRS80 (Geodetic Reference System, 1980). MAGNA está conformada por cerca de 70 estaciones GPS de cubrimiento nacional de las cuales 6 son de funcionamiento continuo, 8 son vértices SIRGAS y 16 corresponden con la red geodinámica CASA (Central and South American Geodynamics Network). Las coordenadas de las estaciones MAGNA-SIRGAS están definidas sobre el ITRF94, época 1995.4 (IGAC, 2016).

- **Sistemas Geodésicos Mundiales WGS84 (World Geodetic System):** es un sistema de referencia terrestre único para referenciar las posiciones y vectores. Se define como un sistema cartesiano geocéntrico con origen en el centro de masa de la Tierra, el eje Z paralelo a la dirección del polo CIO o polo medio definido por el BIH, época 1984.0 con una precisión de 0,005", el eje X como la intersección del meridiano origen, Greenwich, y el plano que pasa por el origen y es perpendicular al eje Z. El eje Y ortogonal a los anteriores, pasando por el origen (IGAC, 2016).
- **Sistemas Geodésicos Mundiales GRS80 (Sistema de Referencia Geodésico 1980):** se caracteriza por tener el origen del sistema coordenadas rectangulares es coincidente con el centro de masas de la tierra, el eje menor, el eje menor del elipsoide tiene la misma dirección que el origen internacional convencional (CIO) designado para el movimiento polar, el meridiano de referencia es el designado por el BIH (Bureau Internatinal de l'Heure).
- **Sistema de referencia Vertical;** Las altitudes geodésicas h se obtienen mediante la tecnología GNSS de manera eficiente y precisa. Están referida a un elipsoide geocéntrico, generalmente el GSR80 (o WGS84, que en este sentido es lo mismo). Carecen de significado geométrico y físico apropiado, por lo que no son de utilidad directa como sistema de altitudes. Su transformación en altitudes ortométrica, distancias a lo largo de la línea de la plomada entre un punto de la superficie de la Tierra y el geoide (definido este como la superficie equipotencial del campo de gravedad terrestre que mejor se ajusta, en el sentido de los mínimos cuadrados, al nivel medio del mar), es inmediata y obedece a la ecuación trivial:

$$H = h - N$$

Siendo N la *ondulación del geoide*, es decir, la distancia entre el geoide y el elipsoide medida a lo largo de la normal al elipsoide.

Así pues, convertir altitudes geodésicas (o elipsoidódicas h) en altitudes geodésicas H requiere de un geoide. Puesto que las altitudes geodésicas h pueden obtenerse con un par de centímetros de precisión este sería el valor óptimo del error relativo de un geoide (IGAC, 2016).

- **Geoides Globales:** una solución al problema que se plantea en el apartado anterior viene dada por los modelos geopotenciales globales. Estos consisten en un conjunto de coeficientes a partir de los cuales es posible calcular la ondulación del geoide en cualquier punto de la tierra a partir de sus coordenadas geodésicas. El Modelo Gravitacional Terrestre

EGM08, realizado por la Agencia Geoespacial Americana, ‘*US National Geospatial Agency*’ es el más preciso de los modelos en la actualidad. Consiste en aproximadamente 3.000.000 de coeficientes calculados a partir de la base de datos gravimétrica mundial, otros datos gravimétricos obtenidos a partir de satélites artificiales, modelos digitales del terreno y datos de altimetría del nivel medio del mar. La resolución de este modelo es de ~ 9 km y la precisión varía mucho de un lugar a otro de la tierra, dependiendo de la cantidad y calidad de los datos con que haya contribuido esa región a la determinación de los coeficientes y en general de la orografía de la región, ya que la topografía contribuye con el mayor aporte a las cortas longitudes de onda de la señal gravitatoria. Una de las primeras tareas a realizar en la zona deberá ser calibrar la precisión de este EGM08 en la región. (IGAC, 2016).

- **Modelos Locales:** existen esencialmente dos métodos para el cálculo de geoides locales precisos. Se basan ambos en la transformación de las fórmulas de Stokes o Molodensky para poder calcular las altas frecuencias de las señales del geoide. En ambos casos se parte de un modelo geopotencial global y se utiliza la técnica eliminación - restitución. Brevemente consiste en abstraer de las anomalías gravimétricas locales los valores de anomalías calculados con los modelos globales, obteniéndose así las anomalías residuales. Estas anomalías residuales convertidas en anomalías de altitud a partir de las fórmulas de Stokes se añaden a las ondulaciones calculadas mediante el modelo global consiguiéndose así un modelo local refinado. En el caso de regiones de una orografía rugosa (como es el nuestro) se pueden utilizar las técnicas de anomalías residual del terreno (Forsberg and Tscherning 1981; Forsberg 1984, 1985), consistente en eliminar las componentes de baja frecuencia ya implicadas en los modelos globales mediante un Modelo Digital del Terreno y transformar el modelo residual del Terreno en anomalías de altitud mediante el cálculo del potencial gravitacional a partir de las fórmulas de la atracción de estructuras prismáticas (IGAC, 2016).
- **Geoide local preciso en el valle del río cauca -GEOVALLE-:** la realización de un geoide preciso en la región del Valle del Cauca surgió como una iniciativa de la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC) quien se dio a la tarea de la de combinar el modelo EGM08 con nuevos datos gravimétricos (siguiendo la técnica de remove – restore basada en las fórmulas de Stokes y Molodensky) y con los modelos digitales STRM y DTRM2006.0. para esto, fueron necesarios nuevos datos gravimétricos, es decir, datos que no hayan participado en la determinación del modelo global EGM08. Estos nuevos datos gravimétricos se obtuvieron mediante un levantamiento (de no muy elevada densidad de puntos) a realizar en la zona utilizando un gravímetro La Coste-Romberg más los procedentes de un vuelo Aero gravimétrico (en caso de que estos últimos datos sean de la calidad adecuada) realizado con otros propósitos en la región de estudio. El STRM es un moderno modelo digital, de dominio público, de una resolución de 3’. El EDM2006.0 es el desarrollo en armónicos esféricos de la topografía terrestre realizado por el mismo equipo que calculó el EGM08. sirvió como filtro para las componentes de alta frecuencia del STRM.

El proceso incluyó:

- Determinación de la precisión del modelo global EGM08 en la región a partir de los puntos de nivelación que haya en la zona. Si estos puntos tienen solo altitudes niveladas se realizaron mediciones gravimétricas en ellos con el fin de dotarlos de altitudes ortométricas. Se realizarán también medidas GPS, con lo cual se obtuvo en dichos puntos las correspondientes ondulaciones de geoides. Comparadas con las obtenidas a partir de los modelos globales obtendremos su precisión.
- Se efectuó un levantamiento gravimétrico en la región dadas las condiciones orográficas (y otras) y se calculó la contribución de la topografía a partir de los Modelos Digitales del Terreno.
- Una vez recopilados los datos, homogeneizados, filtrados y determinado su precisión se extrapolaron mediante de técnicas de Colocación a una malla suficientemente densa de valores a partir de los cuales y mediante técnicas que son estándar calcularemos una maya con las ondulaciones del geoides.
- A partir de este proceso, se construyó el modelo geoidal conocido como GEOVALLE, el cual se encuentra disponible en la página institucional de la CVC (<http://www.geo.cvc.gov.co/visor/>)

1.2. LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO CON ESTACIÓN TOTAL

El levantamiento topográfico es el conjunto de operaciones realizadas con instrumentos adecuados en una superficie de terreno para su posterior presentación, grafica o en planos. En él, se combinan dos áreas de la topografía, la planimetría y la altimetría, permitiendo mostrar tanto la posición como la elevación de los puntos del terreno (Franquet, 2010).

La Altimetría: medición de las diferencias de nivel entre los diferentes puntos del terreno, usando, ángulos verticales y distancias, o distancias verticales a partir de un plano horizontal de referencia. Básicamente para el cálculo de desnivel se presentan dos situaciones: calcular el desnivel de dos puntos cuando el terreno es ascendente y descendente. En la Figura 1.1 se observa el cálculo para cada situación.

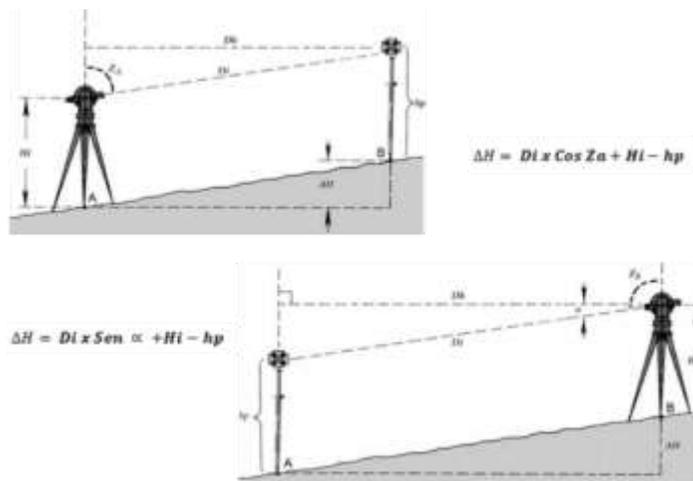


Figura 1.1. Nivelación Trigonométrica, Situaciones
Fuente: Ministerio de Agricultura Chile, 2014

Los métodos altimétricos o de nivelación se clasifican en:

- Nivelación Geométrica: mediante visuales horizontales se calculan los desniveles.
- Nivelación Trigonométrica: la medida de ángulos y distancias es usada para calcular el desnivel por medio de procedimientos trigonométricos.
- Nivelación Barométrica: Menos precisa, utiliza un barómetro para medir el desnivel entre puntos, mediante la variación de la columna de mercurio.

La Planimetría: proyección del terreno sobre un plano horizontal, usando, ángulos horizontales y distancias, a partir de un punto y una línea de referencia. El conjunto de líneas que une los puntos se denomina poligonal, que es la estructura base del levantamiento, a partir de la cual se detalla el terreno.

La Poligonal, puede ser abiertas o cerrada. En la primera, se parte de un punto conocido con una línea de referencia y se termina en otro punto conocido. Para la segunda, se parte de un punto conocido con una línea de referencia y al final del trayecto se vuelve al punto de partida (Figura 1.2.).

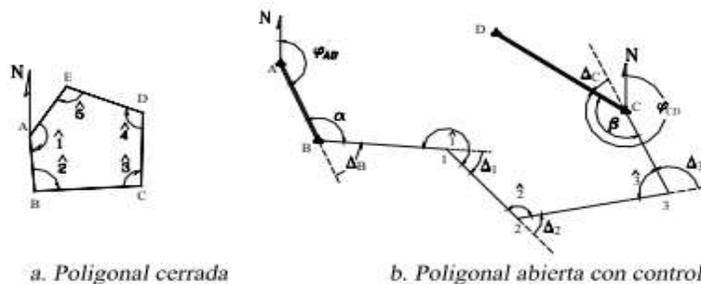


Figura 1.2. Tipos de Poligonal

Fuente: (Casanova, 2002)

El error de cierre de la poligonal abierta o cerrada, resulta de las diferencias entre los valores obtenidos de las observaciones, y los valores conocidos. Diferencia que es ocasionada por errores angulares y lineales. Su tolerancia está dada según las características del instrumento, la longitud y el número de punto de la poligonal. El error angular debe ser menor que la tolerancia angular, de lo contrario debe volver a medirse los ángulos (Casanova, 2002).

Error de cierre angular poligonal abierta:

$$Ea = \sum < Int - (n - 2) * 180$$

$$Ta = a\sqrt{n}$$

Donde,

Ea , es el error angular

$\sum < int$, es la sumatoria de ángulos internos

a , es la apreciación del instrumento

n , es el número de lados

(Casanova, 2002)

Error de cierre angular poligonal cerrada:

$$Ea = A_{fc} - A_f$$

Donde,

A_{fc} , es el azimut final calculado

A_f , es el azimut final conocido

(Casanova, 2002)

Error lineal de la poligonal cerrada:

$$\begin{aligned}\varepsilon\Delta N &= \sum \Delta_{N-S} \\ \varepsilon\Delta E &= \sum \Delta_{E-O} \\ \varepsilon l &= \sqrt{\varepsilon\Delta N^2 + \varepsilon\Delta E^2}\end{aligned}$$

Donde,

$\varepsilon\Delta N$, es la sumatoria de las proyecciones en el eje N-S

$\varepsilon\Delta E$, es la sumatoria de las proyecciones en el eje E-O

εl , es el error lineal

(Casanova, 2002)

Error lineal de la poligonal abierta:

$$\begin{aligned}\varepsilon\Delta N &= \sum \Delta_{N-S} - \Delta N_{BC} \\ \varepsilon\Delta E &= \sum \Delta_{E-O} - \Delta E_{BC} \\ \varepsilon l &= \sqrt{\varepsilon\Delta N^2 + \varepsilon\Delta E^2}\end{aligned}$$

Donde,

$\sum \Delta_{N-S}$, es la sumatoria de las proyecciones sobre el eje N-S

$\sum \Delta_{E-O}$, es la sumatoria de las proyecciones sobre el eje E-O

ΔN_{BC} , es la diferencia entre las coordenadas Norte del punto inicial y el final

ΔE_{BC} , es la diferencia entre las coordenadas Este del punto inicial y el final

(Casanova, 2002)

Precisión de la poligonal:

$$p = \frac{\varepsilon l}{\sum L}$$

Donde,

$\sum L$, es la sumatoria de los lados de la poligonal en metros

p , es la precisión.

(Casanova, 2002)

La innovación en los aparatos topográficos ha agilizado y simplificado los procesos que se realizaban hasta hace poco. Uno de ellos es la Estación Total, instrumento que reúne tres componentes básicos; teodolito electrónico digital, distanciómetro electrónico y microprocesador.

La Estación puede medir ángulos horizontales, verticales y distancias inclinada, valores que aparecen de a través de una pantalla y un procesador que realiza los cálculos de distancia y desnivel. Si las coordenadas del punto ocupado y el azimut de la línea de referencia son conocidos, se pueden obtener de forma inmediata las coordenadas del siguiente punto, aparecen en la pantalla y pueden ser almacenadas en la memoria interna o en un colector externo.

El microprocesador realiza múltiples funciones: promediar ángulos y distancias, corregir ángulos horizontales y verticales por errores de colimación, corregir distancias por refracción atmosférica y presión, corrección por prisma, corrección por curvatura y refracción a elevaciones determinadas por nivelación trigonométrica, reduce las distancias inclinadas a sus componentes horizontal y vertical, realiza el cálculo de coordenadas de puntos de la poligonal y sus radiaciones, entre otras cosas.

La precisión depende de que tan avanzada sea la tecnología incorporada. Actualmente se encuentra con:

- Precisión angular de 0.5''
- Precisión en distancia de 0.6 mm+1ppm
- Alcance de 3 Km

1.3. TOPO BATIMETRÍA

Es el levantamiento del relieve de superficies subacuáticas o fondos, cuyos resultados son plasmados gráficamente y sirven de base para otras actividades.

La batimetría se puede realizar dependiendo de la profundidad, ya sea por métodos convencionales como el vadeo (caminar por el lecho de la cuenca) con Estación Total, Ecosonda análoga o digital, o con los equipos de última tecnología como el ADCP HWR600-1 *teledyne* o el RS-M9 Sontek.

En los levantamientos batimétricos con topografía convencional, los puntos forman perfiles alineados en una determinada dirección, generalmente perpendiculares al eje a la trayectoria de la fuente hídrica y paralelos entre ellos, (Figura 1.3).

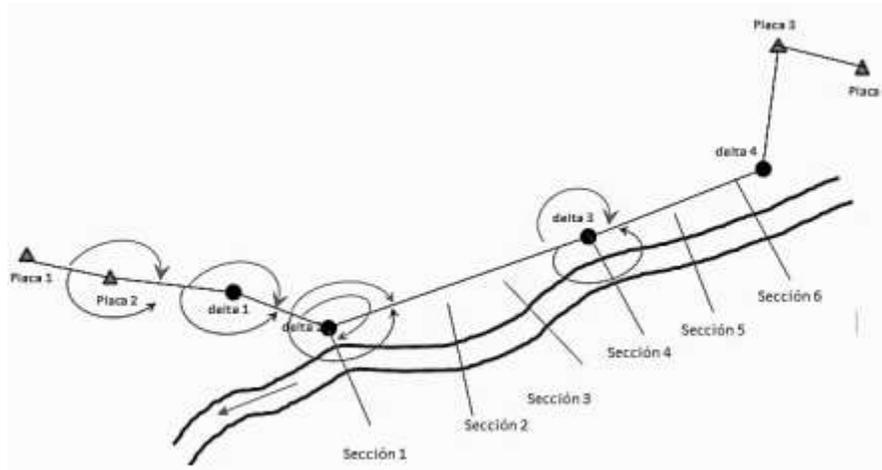


Figura 1.3. Levantamiento Batimétrico
Fuente: Farjas Abadía, 2007

El número de puntos depende de la escala del levantamiento, un punto por cm² de plano. La distancia entre los perfiles o secciones transversales será el que corresponda a este centímetro en la escala del levantamiento, (Farjas Abadía, 2007).

La batimetría con ecosonda requiere de una embarcación donde La Sonda y el receptor GNSS se encuentran conectados entre sí y también a un ordenador portátil que, mediante un Software de navegación y registro de datos, permite sincronizar ambos equipos y registrar coordenadas XYZ del lecho, con un error inferior al 3% de la altura de columna de agua que sumerge el fondo medido.

Para la toma de puntos se realizan una serie de perfiles transversales al eje del río separados entre una cierta distancia y con toma de puntos aproximadamente cada 3 metros en el sentido de cada pasada y a su vez se realiza una pasada en el sentido longitudinal del río para la obtención de puntos de comparación (Gallardo, 2014) (Figura 1.4).

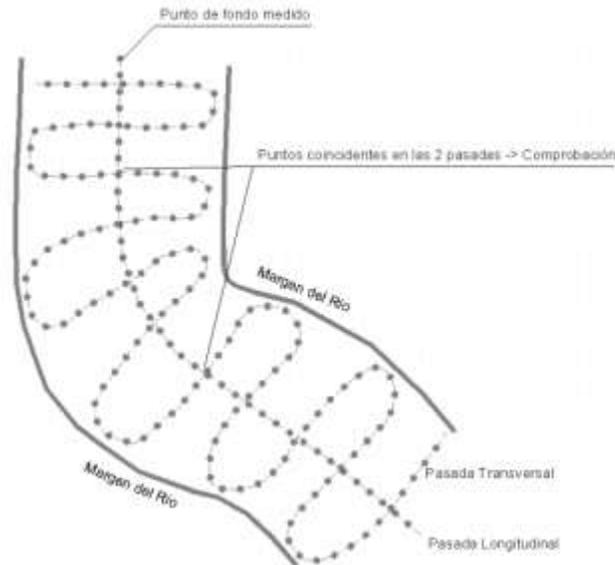


Figura 1.4. Esquema Batimetría de río por Ecosonda
Fuente: Gallardo, 2014.

Según el IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales), para los cuerpos de agua grandes, como ciénagas embalses, lagos y ríos de primer orden (como: Magdalena, Cauca, Amazonas, Atrato, San Jorge), se deben establecer recorridos sinusoidales con espaciamentos promedios de 250 metros entre secciones, para los ríos secundarios, caños conectores, canales y quebradas, el espaciamento entre secciones debe estar del orden de los 150 metros y para los cuerpos de agua menores el espaciamento entre los perfiles debe estar del orden de los 100 m (IDEAM, 2013).

2. METODOLOGÍA

La metodología del presente estudio, plantea tres frentes de desarrollo de actividades, el primero es el estudio de los requerimientos de insumos geomáticos primarios, abstraídos de la metodología de zonificación de amenazas por movimientos en masas e inundaciones el segundo es la aplicación de los estándares de calidad para el levantamiento y evaluación de productos espaciales y el tercero es la instrumentación y el diseño de los procedimientos de campo para el levantamiento de la información requerida, con las especificaciones deseadas para fines de zonificación de amenazas (Figura 2.1).

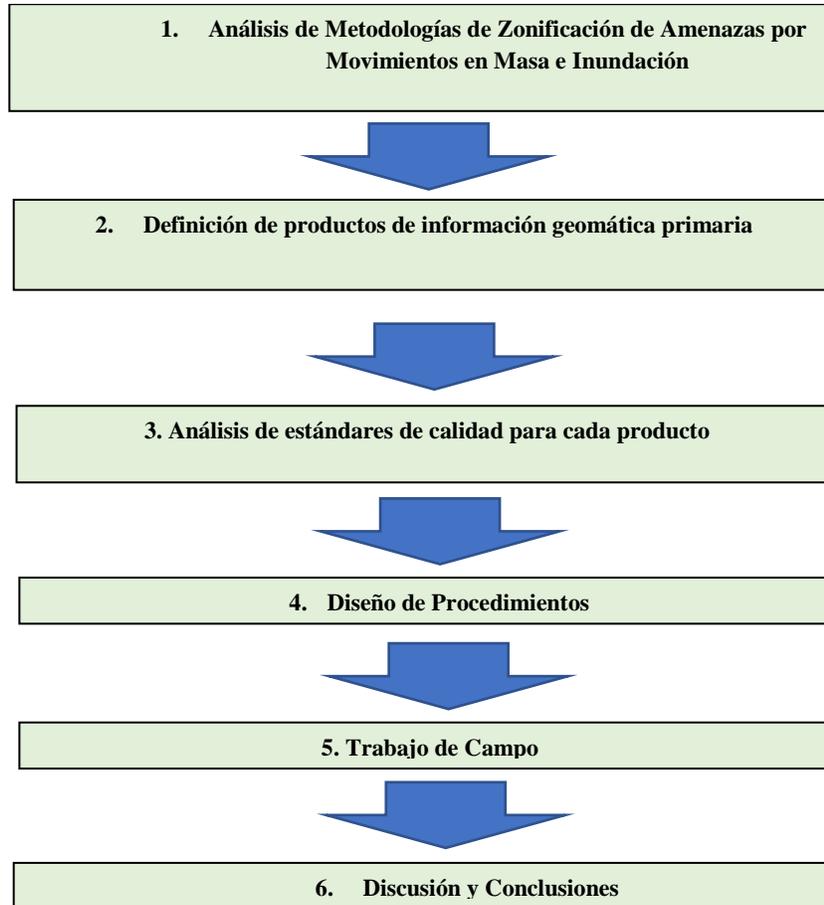


Figura 2.1. Esquema metodológico
Fuente: elaboración propia.

2.1. ANÁLISIS DE METODOLOGÍAS DE ZONIFICACIÓN DE AMENAZAS POR MOVIMIENTOS EN MASA E INUNDACIONES

Se revisaron de manera detallada las metodologías de zonificación de amenazas por movimientos en masa e inundaciones para determinar los insumos producto de levantamiento de información primaria en campo, con el fin de establecer sus características técnicas, Sistema de referencia, especificaciones, escalas, errores asociados, formatos de salida, etc.

De acuerdo con la guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa, desarrollado por el Servicio Geológico Colombiano (SGC) y la Universidad Nacional (UNAL), mediante el Convenio Especial de Cooperación 020 del 2013, la gestión de riesgo comprende tres etapas: el análisis de riesgo, la evaluación de riesgo, la mitigaciones y prevención del riesgo.

2.2. ANÁLISIS DE RIESGOS

Como se definió en los conceptos generales esta abarca etapas de estudio como son, el análisis de amenaza, análisis de vulnerabilidad y cálculo del riesgo.

En la primera etapa del análisis de riesgos o análisis de amenazas se debe definir un modelo geológico-geotécnico, en el cual se tiene en cuenta la inestabilidad del área de estudio, se plantea escenarios de amenaza y se zonifica la amenaza, de los cuales se obtienen mapas de amenazas. Según lo dispuesto en el Decreto 1807 de 2014 para realizar los estudios de amenaza se requiere cartografía básica del área a escala 1:5000 y a partir de ella se genera la cartografía temática correspondiente a la cartografía geológica, geomorfológica, geomorfodinámica, cobertura y uso de suelos. Para estudios de detalle se realiza a escala 1:2000, también se utiliza insumos como modelo digital de terreno, topografía, sensores remotos (fotografías aéreas, ortofotos, imágenes satelitales, entre otros) ver Figura 2.1, información existente en estudios y mapas de amenazas naturales, vulnerabilidad y riesgo a local y la recopilación de información existente acerca de eventos amenazantes ocurridos con anterioridad en la zona de estudio.

La segunda etapa que corresponde al análisis de vulnerabilidad se identifica los escenarios de vulnerabilidad y se zonifica la vulnerabilidad. Los escenarios de vulnerabilidad se construyen a partir de los escenarios de amenazas. Una vez se tengan esos escenarios de amenazas se procede a realizar la zonificación de vulnerabilidad, construyendo mapas en los que se identifiquen las zonas de alta, media y baja vulnerabilidad.

Por último, en el cálculo del riesgo se tiene en cuenta el valor probable de pérdidas por año, separando las pérdidas de vidas humanas y las pérdidas económicas. La cuantificación es útil para gestionar el riesgo ya que integra el análisis costo-beneficio y proporciona la base para la priorización de acciones de mitigación y designación de recursos (IGAC, 2016).

2.3. EVALUACIÓN DE RIESGOS

En esta evaluación se comprende la definición de criterios de seguridad, aceptabilidad, tolerancia del riesgo para definir los niveles de riesgo alto, medio o bajo con los que se construye el mapa de zonificación de riesgos.

Se busca la manera de prevenir los daños ante las posibles amenazas y las medidas de mitigación y prevención del riesgo, puesto que son el resultado específico de cada uno de los estudios de riesgo que se realicen (Tabla 2.1).

Tabla 2.1. Resumen requerimientos según metodología

INSUMOS	ESCALA	DESCRIPCIÓN
Cartografía Base	1:2000 o 1:5000	Urbanística georreferenciada
DTM	1:5000	Tamaño de pixel 1x1 m, validada
Topografía Básica	1:5000	Georreferenciada, densificada
Topo batimetría	1:5000	Secciones transversales, longitudinales, DTM e inventario obras

Fuente: elaboración propia.

3. DEFINICIÓN DE PRODUCTOS DE INFORMACIÓN GEOMÁTICA PRIMARIA

Se elabora un listado de insumos de campo requeridos para el inicio de las labores del proyecto, adicionalmente se discriminan sus especificaciones técnicas, escalas, errores asociados, formatos de salida, entre otros.

- **Cartografía básica** de los sectores urbanos del municipio de Roldanillo en formato digital, con las características urbanísticas como sistema vial, equipamiento (salud, educación, recreación, etc.), infraestructura de servicios público, aguas superficiales entre otros. Referida al sistema de coordenadas MAGNA Sirgas y los mapas se presentarán en un sistema de proyección cartesiana (Norte, Este) a escala 1:5000 o 1:2000 a un tamaño de 75x50 cm.

La CVC entregó los insumos para la construcción de esta cartografía base a partir de imágenes tomadas con fotogrametría durante el año 2013, por lo tanto, en este producto no fue necesario programar actividades de campo, salvo para validación de datos y toponimia.

- **Modelo Digital de Terreno:** en el marco del convenio 0205 de 2017, la CVC entregó un modelo de elevación digital obtenido mediante técnicas de LIDAR durante el año 2013, esta información se encuentra en formato raster con un tamaño de pixel 1x1 m, referido al sistema de referencia MAGNA SIRGAS para la componente horizontal y en datum GEOVALLE para las alturas, para el municipio de Roldanillo en escala 1:5000, a la que debe integrarse la información correspondiente a las superficies subacuáticas por técnicas de levantamientos topobatimétricos que incluyen batimetría e hidro topografía. En la batimetría se realiza el levantamiento del relieve de las superficies subacuáticas y en hidro topografía se obtiene tanto la batimetría del cuerpo de agua como la topografía de orillas y las zonas de planicie que bordean dicho cuerpo de agua.
- **Topografía básica complementaria:** consiste en la realización de los levantamientos complementarios para la descripción de los fenómenos estudiados, estos deben estar amarrados a la red geodésica nacional, debidamente materializada en las zonas de interés de cada uno de los tres municipios.
- **Topo batimetría** de los cuerpos de agua del Rio Roldanillo, Zanjón de los Mudos y Río El Rey en el municipio de Roldanillo. Presentados en formato DWG en escala horizontal 1:100 y vertical 1:10, con una precisión dada por el ajuste en el levantamiento topográfico convencional.

3.1. ANÁLISIS DE ESTÁNDARES DE CALIDAD DE CADA PRODUCTO

Se efectúa una revisión técnica de los estándares de calidad, más adecuados para la evaluación de los productos y su dimensionamiento, para esto se tendrá en cuenta las normas técnicas internacionales y los procedimientos recomendados.

3.1.1. Cartografía básica digital

- **Resolución Espacial:** corresponde al tamaño mínimo de representación del terreno o GSD (Ground Sample Distance). Un mayor tamaño de pixel indica menor resolución. De acuerdo al IGAC la resolución espacial expresada en GSD se puede observar en la Tabla 3.1 (IGAC, 2016).

Tabla 3.1. Resolución espacial expresada en GSD

ÍNDICE HOJA	GSD
1:1.000	10 centímetros
1:2.000	20 centímetros
1:5.000	30 centímetros
1:10.000	50 centímetros
1:25.000	100 centímetros

Fuente: IGAC, 2016

- **Sistema de Referencia:** mediante resolución 068 de 2005 se adoptó como único datum oficial de Colombia el Marco Geocéntrico Nacional de Referencia MAGNA-SIRGAS (Tabla 3.2)

Tabla 3.2. Sistema de coordenadas geográficas MAGNA

SISTEMA DE COORDENADAS GEOGRÁFICAS: GCS_MAGNA	
Código	4686
Unidad Angular:	0,017453292519943299 grados decimales
Primer Meridiano:	Greenwich 0,000000000000000000
Datum geodésico:	MAGNA_SIRGAS
Elipsoide:	GRS 1980
Semieje mayor:	6378137
Semieje menor:	6356752,314
Aplanamiento Inverso	298,2572221

Fuente: IGAC, 2016

- **Proyección Cartográfica:** cuando la cartografía es a gran escala se proyecta a un sistema de coordenadas cartesianas locales, de lo contrario se proyecta al sistema de coordenadas Gauss_Krüger, en el origen correspondiente, según su localización geográfica que se muestra en la Tabla 3.3 Por la ubicación de la zona de estudio corresponde a MAGNA Oeste (IGAC, 2016).

Tabla 3.3. Orígenes de coordenadas GAUSS KRUGER

NOMBRE DEL ORIGEN	COORDENADAS ELIPSOIDALES		COORDENADAS Gauss	
	LATITUD	LONGITUD	NORTE (m)	ESTE (m)
Central-Magna (C)	4°35'46,3215"	74°04'39,0285"	1'000.000	1'000.000
Este-Central-Magna (EC)	4°35'46,3215"	71°04'39,0285"	1'000.000	1'000.000
Este-Este- Magna (EE)	4°35'46,3215"	68°04'39,0285"	1'000.000	1'000.000
Oeste- Magna (W)	4°35'46,3215"	77°04'39,0285"	1'000.000	1'000.000
Oeste-Oeste-Magna (WW)	4°35'46,3215"	80°04'39,0285"	1'000.000	1'000.000
Oeste-Insular-Magna (WI)	4°35'46,3215"	83°04'39,0285"	1'000.000	1'000.000

Fuente: IGAC, 2016

- **Exactitud Posicional Absoluta:** la base cartográfica garantizará la exactitud posicional absoluta al 95% de confianza de acuerdo con la siguiente Tabla 3.4:

Tabla 3.4 Exactitud absoluta de posición por escalas

ESCALA	HORIZONTAL (m)	VERTICAL	EXACTITUD	EXACTITUD
1:1.000	0,21m	0,30m	0,52m	0,73m
1:2.000	0,43m	0,60m	1,04m	1,47m
1:5.000	1,06m	1,50m	2,60m	3,67m
1:10.000	2,13m	3,00m	5,20m	7,34m

Fuente: IGAC, 2016

- **Exactitud Posicional Relativa:** verificación de la fidelidad con la cual son capturados los elementos del catálogo de objetos respecto de la fuente de datos considerando la tolerancia de 0,125mm por el módulo escalar, (IGAC, 2016) (Tabla 3.5).

Tabla 3.5. Nivel de tolerancia por escala

ESCALA	TOLERANCIA (m.)
1:1.000	0,125
1:2.000	0,250
1:5.000	0,625
1:10.000	1,250
1:25.000	3,125

Fuente: IGAC, 2016

3.1.2. Construcción de modelos digitales del terreno

Dado que el proyecto cuenta con información suministrada por la CVC que incluye el DTM para los tres municipios, se plantea un trabajo de verificación de esta información, dada la sensibilidad de los modelos de estudio para la zonificación, debido a la escala de sus insumos.

En este sentido, se propone efectuar test de calidad para productos cartográficos que se describen a continuación:

- **NSSAD, National Standard for Spatial Data Accuracy:** el método del Error Medio Cuadrático (RMSE) es utilizado para expresar la precisión del modelo. Los valores de precisión se obtienen con la comparación entre el DTM y los puntos de control, obtenidos del terreno con una muy buena precisión en posición y elevación.

$$RMSE_{(z)} = \sqrt{\frac{1}{n} * \sum_{1}^n (Z_{iDTM} - Z_{iGEO})^2}$$

Dónde,

Z_{DTM} : representa el valor vertical de menor precisión del punto.

Z_{GEO} : representa el valor vertical de mayor precisión del punto, en este caso el levantado por GPS.

n: número de puntos verificados

Si los errores siguen una distribución normal, el factor de 1,96 es aplicado para calcular el error lineal con un nivel de confianza del 95%.

$$\text{Precisión}_{(z)} = 1.9600 * RMSE_{(z)}$$

Se reporta de la siguiente manera: “Comprobado/compilado para __ metros de exactitud vertical al 95% de nivel de confianza”.

Con el fin de hacer un control de calidad óptimo, la ASPRS propone la precisión según el terreno, con los errores (RMSE) y número de puntos de control de acuerdo con el terreno, como se muestra en la Tabla 3.6.

Tabla 3.6. Precisión según el Terreno

TIPO TERRENO	Nº PUNTOS	ERROR MEDIO CUADRÁTICO (RMSE)	PRECISIÓN VERTICAL
Urbano	25	0.071	0.13
Forestal	35	0.116	0.26
Monte bajo	24	0.100	0.18
Cultivo	36	0.980	0.18
Terreno Abierto	47	0.081	0.12
Total Combinado	166	0.094	0.19

Fuente: ASPRS (American Society for Photogrammetry and Remote Sensing), 2004.

La ventaja de esta técnica no es la de decir si es aceptado o denegado, sino que ofrece un índice de calidad del producto en unidades reales sobre el terreno y es el usuario quien establece los límites de aceptación en función de sus necesidades. (ATKINSON, 2003)

- **NMAS, National Map Accuracy Standard:** sobre una muestra de no menos de 20 puntos se indica que como máximo el 10 % de los puntos de la muestra pueden tener un error vertical mayor de la mitad del intervalo de las curvas de nivel.

$$\text{Error}_{(z)} = (Z_{DTM} - Z_{GEO})$$

Dónde,

Z_{DTM} : representa el valor vertical de menor precisión del punto.

Z_{GEO} : representa el valor vertical de mayor precisión del punto, en este caso el levantado por GPS.

Los resultados de esta técnica solo se expresan de la forma cumple o no cumple, sin indicar una medida de inexactitud. (ATKINSON, 2003).

- **Relación NSSAD y NMAS:** la relación entre los test de validación está dada por la siguiente expresión:

$$VMAS = 1.6449 * RMSE_{(z)}$$

Despejando $RMSE_{(z)}$ y utilizando la fórmula de precisión vertical del NSSAD:

$$RMSE_{(z)} = \frac{VMAS}{1.6449}$$

$$Precision_{(z)} = 1.9600 * RMSE_{(z)}$$

Remplazando

$$Precision_{(z)} = \frac{1.9600}{1.6449} * VMAS$$

Entonces la precisión reportada respecto a la NSSAD es

$$NMAI CI = \frac{Precision_{(z)}}{0.5958} = 3.2898 RMSE_{(z)}$$

La fuente de información utilizada para la comparación deben ser puntos de control de terreno, cuya distribución y chequeo proporcionan, un cubrimiento del área del proyecto y el error provee una descripción alrededor del punto.

3.1.3. Muestreo

Una muestra es cualquier conjunto de n unidades tomadas a partir de una población, es representativa y sus características deben reflejar las de la población. La población se debe definir en términos de; unidades, elementos, áreas y periodos de tiempo.

La elección de muestras requiere definir la región de interés, especificar las unidades de muestreo, el tamaño, la forma de los sitios muestreados que van a constituir el soporte de la muestra y el método de muestreo:

3.1.3.1. Muestreo aleatorio

Técnica que permite obtener una muestra representativa de la población, basada en el concepto de probabilidad, de que cualquier elemento de la población tiene la misma probabilidad de ser elegido y que la elección de cada elemento es independiente de cualquier selección previa.

- **Muestreo Aleatorio Simple:** cada elemento de la población tiene una oportunidad igual e independiente de ser seleccionado, para lo cual se le asigna un número. La muestra se determina con tablas de números aleatorios.
- **Muestreo Sistemático:** se selecciona una muestra tomando cada k-ésima unidad de la población, se numeran o arreglan de alguna forma. La letra k es la razón de muestreo, es decir, la razón del tamaño de la población correspondiente al tamaño de la muestra.
 - Ejemplo. Al seleccionar una muestra de 40 unidades de entre una población de 2000, k es $2000/40=50$, por lo que la muestra se obtiene tomando cada 50-esima unidad de la población.
- **Muestreo Estratificado:** la población se divide en clases o grupos, denominados estratos. Las unidades incluidas en cada estrato deben ser relativamente homogéneas con respecto a las características a estudiar. Por ejemplo, se puede realizar un estudio para conocer la opinión de la población sobre un político determinado planteando una muestra estratificada por edades. Como parte de este muestreo, se toma una submuestra a partir de cada estrato

mediante un procedimiento aleatorio simple, de modo que para obtener la muestra general se combinan las submuestras de todos los estratos.

- **Muestreo por Conglomerados:** selección aleatoria de conglomerados a partir de la población. Las diferencias entre los conglomerados son generalmente pequeñas y las unidades dentro de cada uno, normalmente, son más heterogéneas.
 - Por ejemplo, las ciudades con una población de 40 habitantes pueden tener características similares si las comparamos, pero la población es heterogénea. De esta manera el analizar un conjunto de ciudades de 40 mil habitantes ayudaría a caracterizar a la población de todas las ciudades de 50 mil habitantes del país.

3.1.3.2. Muestreos no probabilísticos

Ocurre cuando se realizan muestreos bajo criterios aleatorios y no probabilísticos.

3.1.3.3. Muestreos espaciales

En el análisis muestras espaciales se debe tomar en cuenta su tamaño, representatividad y sesgo, la influencia de los factores temporales y de los efectos de borde, así como sus consecuencias para el análisis; además de determinar si los datos son agregados, entre otros elementos. (De Smith, 2009). Estos factores determinaran el plan de muestreo que se debe considerar. Sin embargo, hay muestreos que pueden tomar la forma de puntos o cuadrantes.

- **Muestreo Aleatorio Simple:** la selección de n sitios se hace de tal manera que cada miembro de una población tiene la misma e independiente probabilidad de ser elegido. Con esta selección no se garantiza que se cubra toda el área de estudio, pues superficies relativamente grandes se quedan sin muestrear o bien las muestras aparentan estar agrupadas ver Figura 3.1.

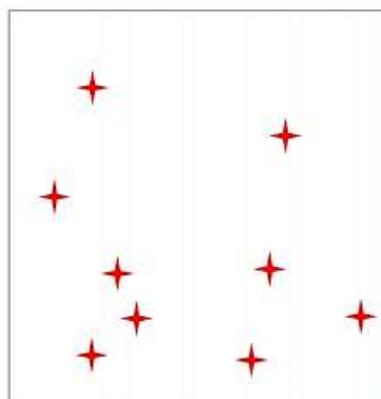


Figura 3.1. Muestreo aleatorio simple
Fuente: (Porrás, 2014). Imagen basada en (Haining, 2003)

- **Muestreo Aleatorio Estratificado:** la población a partir de la cual se elige una muestra es particionada en estratos de área, para los cuales se seleccionan los sitios de muestreo mediante un procedimiento aleatorio simple.

Con este muestreo se disminuye la posibilidad de que existan zonas sin muestras o zonas con alta concentración de muestras. Es importante mencionar que en el muestreo espacial los individuos que pertenecen a un estrato tienen como elemento común un espacio delimitado, por lo cual no son necesarios los valores homogéneos de otras variables ver Figura 3.2.

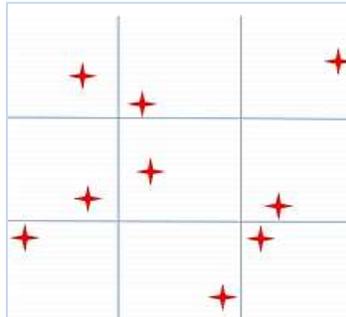


Figura 3.2. Muestreo aleatorio estratificado
Fuente: (Porrás, 2014). Imagen basada en (Haining, 2003).

- **Muestreo Sistemático:** se elige de manera aleatoria el sitio de muestreo para un estrato determinado, mientras que en los estratos restantes el sitio de muestreo se determina a partir de la misma posición relativa. Un caso típico de esto consiste en elegir el centro de cada estrato como sitio de la muestra.

El muestreo sistemático como en el estratificado, la forma que adoptan los estratos no está restringida al rectángulo, ésta puede ser cualquiera, triangular o hexagonal (Figura 3.3).

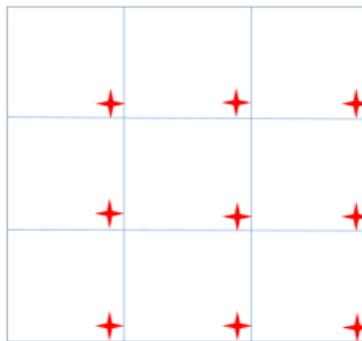


Figura 3.3. Muestreo sistemático
Fuente: (Porrás, 2014). Imagen basada en (Haining, 2003)

Muestreo Anidado: el muestreo requiere que la población se divida en bloques que se subdividen en otros, hasta alcanzar el nivel de detalle que se desee. En cada nivel, los bloques se anidan en bloques en un nivel superior. El propósito de la anidación es captar el comportamiento distintos niveles de escala. Un método para conseguir este objetivo implica establecer la distancia fija de separación entre las muestras en un primer nivel.

Posteriormente se eligen los sitios de segundo nivel, de manera que permanezcan separados a una distancia fija de los sitios de primer nivel, aunque con una dirección seleccionada al azar (Haining, 2003).

En la Figura 3.4 el muestreo anidado se observa las muestras de primer nivel de color rojas y las de segundo nivel, verdes.

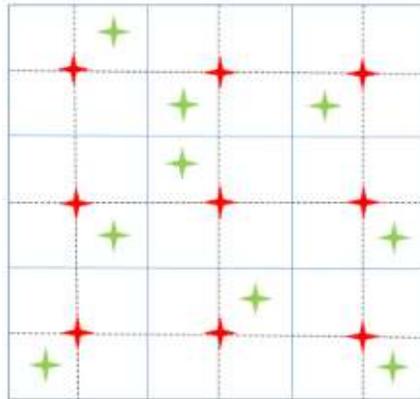


Figura 3.4. Muestreo anidado
Fuente: (Porrás, 2014).

3.1.3.4. Número de puntos

La ASPRS (*American Society for Photogrammetry and Remote Sensing*), recomienda 100 puntos para control vertical por cada 2500 Km² y un mínimo de 20 puntos por cada tres o cinco coberturas terrestres presentes en el área, aunque el número depende del tipo de cobertura terrestre y requerimiento del cliente.

En la Tabla 3.7 aparece un listado con el número de puntos recomendados para chequeo horizontal y vertical, teniendo en cuenta el tipo de cobertura en las cuales hay presencia de vegetación o no en el área. Numero recomendado puntos de chequeo basados en el área.

Tabla 3.7. Numero recomendado de puntos chequeo basados en el área

ÁREA DEL PROYECTO (Km ²)	TEST HORIZONTAL	TEST VERTICAL		
	Nº PUNTOS CHEQUEO	Nº PUNTOS CHEQUEO VERTICAL EN ÁREAS N° VEGETACIÓN	Nº PUNTOS CHEQUEO VERTICAL EN AREAS SI VEGETACIÓN	TOTAL N° PUNTOS CHEQUEO VERTICAL
≤500	20	20	0	20
501-750	25	20	10	30
751-1000	30	25	15	40
1001-1250	35	30	20	50
1251-1500	40	35	25	60
1501-1750	45	40	30	70
1751-2000	50	45	35	80
2001-2250	55	50	40	90
2251-2500	60	55	45	100

Fuente: ASPRS (American Society for Photogrammetry and Remote Sensing), 2004-

3.1.3.5. Distribución de puntos de control

La NSSDA (*National Standard for Spatial Data Accuracy*), ofrece un método de distribución que se puede aplicar a proyectos que son generalmente de forma regular y que en gran parte no tienen vegetación.

Los puntos de chequeo se pueden distribuir más densamente en la proximidad de características importantes y más escasamente en áreas de poco o ningún interés. Cuando los datos existen solo para un parte del conjunto de datos, limite los puntos de prueba a esa área.

Asumiendo que la precisión posicional es uniforme, los puntos pueden ser distribuidos de tal forma que estén espaciados el 10 % de la longitud de la diagonal del conjunto de puntos y el 20% de los puntos este en cada cuadrante.

3.1.3.6. Ubicación de los puntos

Para una buena precisión en la validación del DTM la ubicación de los puntos de chequeo deben de cumplir las siguientes características:

- Ubicados en áreas sin vegetación (terreno despejado y abierto y áreas urbanas)
- Estar a 3 metros como mínimo de cualquier artefacto vertical o cambio abrupto en la elevación
- Estar en pendientes uniformes
- Estar dentro de la porción geoméricamente confiable de ambas franjas (excluyendo los puntos de borde extremos de las franjas).

4. DISEÑO DE PROCEDIMIENTOS

A partir del conocimiento de los requerimientos y los estándares a aplicar, se diseñan los métodos de campo para las diferentes actividades de recolección de datos con GNSS, topografía convencional, micro-geodesia, Batimetría, entre otros.

4.1. CONSTRUCCIÓN REDES DE CONTROL GNSS

La ubicación de los puntos de control que conforman la red GNSS, se hace teniendo en cuenta las zonas de interés, de tal forma que sirvan de base para el levantamiento topográfico, muestreo y futuro monitoreo de movimientos en masa.

- **Materialización:** se fija en campo de manera permanente los puntos de control utilizando insumos como: Pin o anclaje de acero inoxidable de 10 cm de largo y un diámetro de aproximadamente 0.95 cm, Placas de Bronce de 7,5 cm de diámetro y un vástago en acero inoxidable de una longitud de 10 cm, cemento, arena y pintura, (Figura 4.1).



Figura 4.1. Materialización Puntos de Control
Fuente: elaboración propia.

- **Georreferenciación:** se determina la posición del conjunto de puntos mediante un sistema de coordenadas referidas a la superficie terrestre. Utilizando la tecnología GPS.

Los puntos de control se posicionan mediante el método relativo estático, para el cual se emplea 3 receptores, para hacer secciones de tres observaciones, una base y dos puntos, en un periodo de 2 horas, con el cual se garantiza precisiones del orden de $5 \text{ mm} \pm 1 \text{ ppm}$, Figura 4.2.

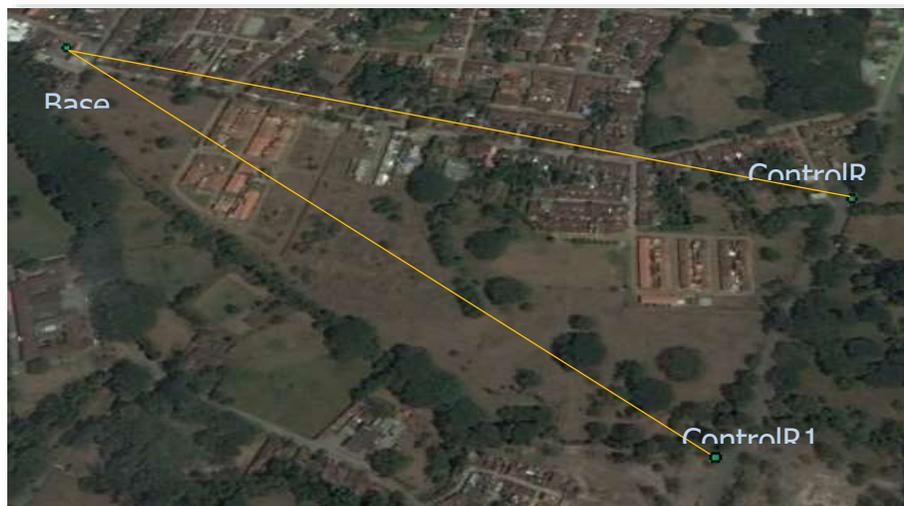


Figura 4.2. Georreferenciación Puntos de Control
Fuente: elaboración propia.

4.1.1. Muestreo

La técnica escogida es la muestra anidada en la que se aprovecha la intersección de calles y carreras para dividir el área en bloques y a su vez estos se pueden subdividir en otros para alcanzar el detalle deseado, en este caso tener unas muestras superiores a 20 puntos de control terrestre para llevar a cabo la validación del DTM, según las especificaciones de la NSSAD (National Standard for Spatial Data Accuracy).

La muestra de puntos de control terrestre de acuerdo con la forma y el tamaño de la zona es de alrededor de 63 en Roldanillo. La captura de la información posicional se realiza con tecnología GPS empleando el método cinemático STOP and GO, para el cual se requiere como mínimos un par de receptores, una base y un punto de control terrestre, con observaciones de 5 minutos.

4.1.2. Topografía Convencional

El levantamiento topográfico tanto del movimiento en masa como el batimétrico se realiza con Estación Total, DT 500, por el método de poligonal abierta controlada, en la que se conoce las coordenadas y azimut inicial y final, permitiendo efectuar los controles de cierre angular y lineal, amarrada a la red de control GNSS.

4.1.2.1. Movimientos en masas

Se identificaron en el municipio de Roldanillo, Movimientos en Masa como deslizamiento por fallamiento y subsidencia. La captura de los detalles del terreno se hace por medio de radiaciones, la densificación se hace de tal forma que se obtenga una representación muy detallada de este fenómeno en el área de estudio.

4.1.2.2. Batimetría fluvial para cuerpos de agua pequeños y drenajes intermitentes

Los cauces del proyecto al tener caudales bajos e inexistentes hacen que la captura de puntos que los define se haga mediante la técnica de vadeo, es decir a pie, desde observaciones hechas en tierra.

La estructura de la poligonal para el levantamiento de la información se caracteriza por ir paralela al eje del cauce, y los puntos o deltas que la conforman están ubicados de tal forma que pueden barrerse mediante el método de radiaciones, varios perfiles transversales, los cuales están paralelos entre sí a una distancia de 20 metros en tramos rectos. Los perfiles transversales contienen detalles como: la llanura de inundación, fondo, espejo de agua y detalles de la ribera.

La recolección de datos sobre las obras de arte a lo largo de cada uno de los cauces se hace combinando dos métodos. La topografía convencional para dar ubicación geográfica e imágenes impresas sobre las cuales se anota las medidas a cinta de los detalles estructurales de las obras.

- **Rio Roldanillo:** es una fuente hídrica de bajo caudal, bordes arborizados en la mayor parte de su recorrido por el casco urbano, tramos con estructuras de control y un total de diez obras de arte entre box culvert, pontones y puentes de corta longitud. El levantamiento de detalles del cauce se hace a lo largo del eje unos 2.300m aproximadamente, con perfiles transversales cada 20 m que abarcan el ancho de la zona inundable.
- **Zanjón de Ipira o los Mudos (Roldanillo):** Cauce seco, canalizado en más del 80% de su recorrido por el municipio, con tramos entamborados, arborización presente en el tramo sin canalizar y después de la calle 4 hacia la zona del mirador, catorce obras de arte entre box culvert y pontones. El levantamiento de detalles del cauce se hace a lo largo del eje unos

1.750 m aproximadamente, con perfiles transversales cada 20 m que abarcan el ancho de la zona inundable.

- Río el Rey (Roldanillo): Cauce seco, arborizado a lo largo de su recorrido, altura del canal principal es mayor que los dos cauces anteriores, presenta algunas obras de contención, pero no de forma continua, cinco obras de arte entre box culvert, pontón y puentes. El levantamiento de detalles del cauce se hace a lo largo del eje unos 2.000 m aproximadamente, con perfiles transversales cada 20 m que abarcan el ancho de la zona inundable.

5. TRABAJO DE CAMPO

Se diseñaron y ejecutaron los trabajos de campo para 6 tipos de información requerida dentro de los cuales se encuentran:

- Amarre de redes a la Red Geodésica Nacional
- Construcción de red de control topográfico mediante GNSS
- Evaluación de calidad de un Modelo de elevación del terreno DTM
- Levantamientos Topográficos convencionales
- Elaboración de secciones Topo batimétricas
- Levantamiento de infraestructura y estructuras de control hidráulico.

6. RESULTADOS AMARRE A LA RED GEODÉSICA NACIONAL

En esta actividad se estudió la disponibilidad de estaciones de la red geodésica nacional pertenecientes a la red MAGNA pasiva y a la red MAGNA ECO, posteriormente se efectuó el trabajo de campo para la materialización de los puntos de control definidos en el diseño.

A partir de la estación MAGNA ECO de Zarzal se amarró la red local a la red MAGNA en el municipio de Roldanillo (Figura 6.1).

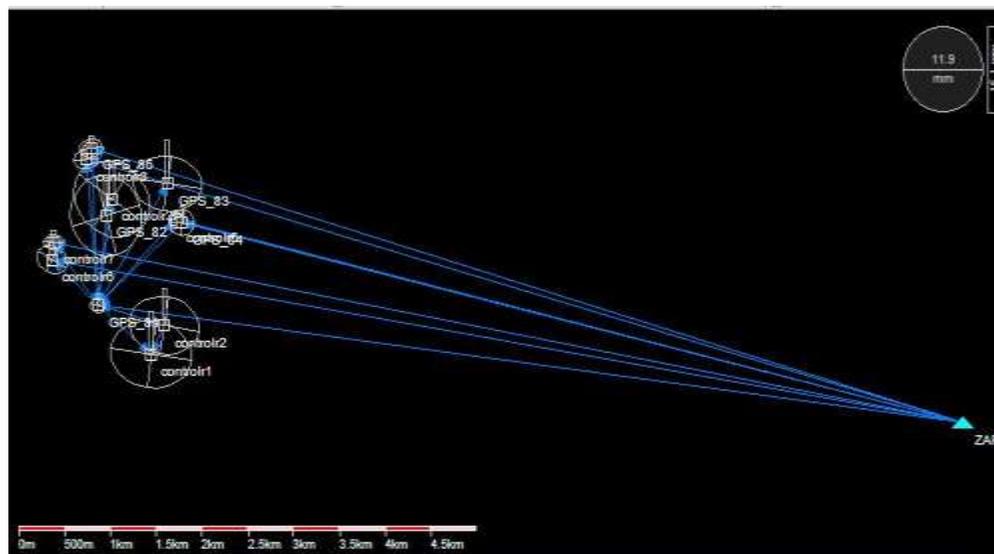


Figura 6.1. Diseño de la red de amarre a MAGNA Municipio de Roldanillo

Fuente: elaboración propia.

Los errores generados en el cálculo de cada uno de los puntos fueron de orden milimétrico, quedando las redes para los dos municipios con precisión de 1 a 2 cm.

6.1. EVALUACIÓN DE CALIDAD DE UN MODELO DE ELEVACIÓN DEL TERRENO

En esta actividad se siguieron procedimientos de calidad de la información espacial de estándares internacionales, para esto se diseñó un muestreo, acorde con la revisión realizada de modo regular en rejilla, definida por la estructura de la malla vial.

Los puntos de control terrestre posicionados con tecnología GNSS durante el proceso de muestreo fueron postprocesados en el software Leica Geosystem, con el fin de obtener las coordenadas elipsoidales referidas al sistema WGS84, para luego ser descargadas en el software ArcGis y realizar la proyección de WGS84 a MAGNA Colombia Oeste, junto con los ráster que contienen el DTM Geovalle y el DTM de Roldanillo (Figura 6.2).

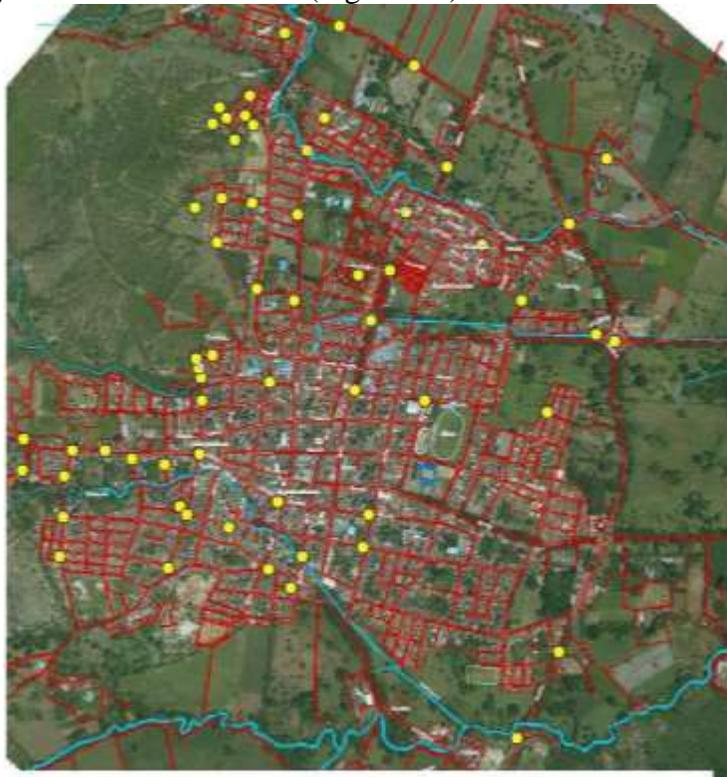


Figura 6.2. Muestra de datos para Validación DTM Roldanillo

Fuente: elaboración propia

Mediante la herramienta Extract Values To Point se extrae el valor del raster para cada punto primero con respecto del DTM Geovalle (llamado GEO) y luego con respecto al DTM Roldanillo (llamado DTM), valores que representan la ondulación o diferencia entre el elipsoide y el geoid.

Para la validación del DTM se realiza el Test de precisión vertical de la NSSDA (National Standard for Spatial Data Accuracy):

$$(Z_{DTM} - Z_{GEO})$$

Dónde,

Z_{DTM} : representa el valor vertical de menor precisión del punto.

Z_{GEO} : representa el valor vertical de mayor precisión del punto, en este caso el levantado por GPS.

Si el valor de la diferencia es positivo indica que el error está por encima de la altura del terreno y si es negativa este se encuentra por debajo de la altura de terreno para ese punto.

Obtenido el error vertical para cada punto de control se calcula el RMSE (Z):

$$RMSE_{(z)} = \sqrt{\frac{1}{n} * \sum_{1}^n (Z_{iDTM} - Z_{iGEO})^2}$$

Antes de usar el test de precisión de la NSSDA, se debe asegurar que los errores siguen una distribución normal. Una forma es calculando algunos estadísticos de tendencia como la media, y otros de dispersión como la desviación estándar, la asimetría y la curtosis con los cuales se puede determinar su distribución sin hacer un gráfico.

Con las siguientes formulas se calcula los estadísticos para datos agrupados, Tabla 6.1.

Media

$$\bar{X} = \frac{\sum \text{Marca} * f}{n}$$

fes la frecuencia

n es el numero de datos

Marca es la marca de clases

Desviación estándar

$$S = \sqrt{\frac{\sum (\text{Marca} - \bar{X})^2 * f}{n}}$$

S es la desviacion estandar para datos agrupados

Asimetría. Coeficiente de asimetría de Fisher

$$g_1 = \frac{\frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n ((\text{Marca} - \bar{X})^3 * f)}{S^3}$$

\bar{X} es la media para datos agrupados

S es la desviacion estandar para datos agrupados

Curtosis

$$g_2 = \frac{\frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n ((\text{Marca} - \bar{X})^4 * f)}{S^4}$$

Tabla 6.1. Estadísticos para determinar distribución normal de datos

DTM	RMSE _(z)	MEDIA	DESVIACIÓN ESTÁNDAR	ASIMETRÍA	CURTOSIS
Roldanillo	0,216	-0.1323	0,027	-226.542	6249.699

Fuente: elaboración propia

Los valores cercanos a cero de la desviación corroboran la concentración de datos alrededor de la media.

El valor cercano a cero de la asimetría indica que tiene una distribución muy cercana a la normal, pero su valor negativo indica que tiende a desplazarse ligeramente a la izquierda.

Como el valor **curtosis** > 3 se trata de una distribución leptocúrtica, es decir que hay una gran concentración alrededor de la varianza. Distribución normal de los datos corroborado gráficamente con los histogramas de la Figura 6.3.

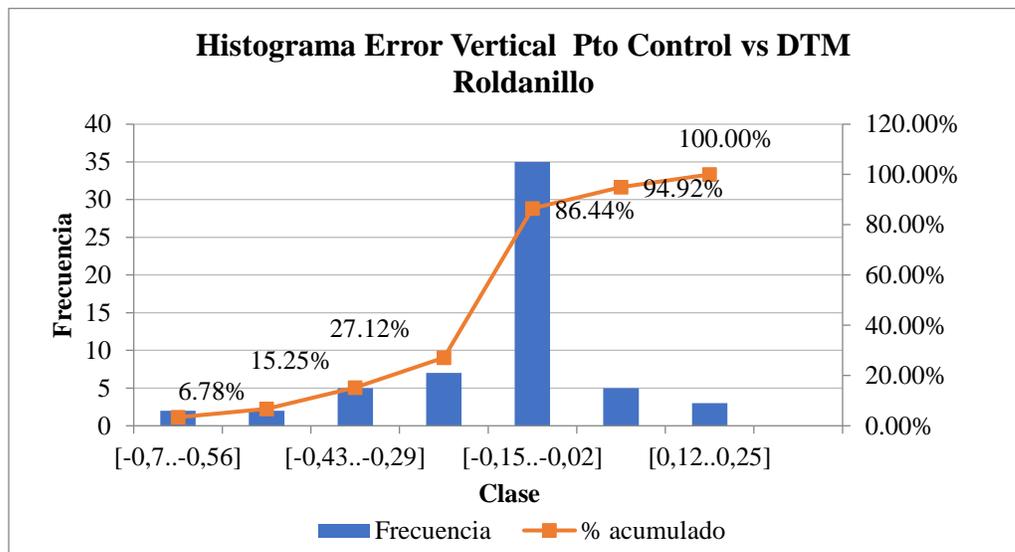


Figura 6.3. Distribución Normal del Error Roldanillo

Fuente: elaboración propia.

Corroborada la proximidad a la distribución normal de los datos se aplica el test de NSSDA (National Standard for Spatial Data Accuracy), el cual utiliza la raíz del error medio cuadrático (RMSE, Root Mean Square Error) para reportar una precisión con el 95% de confianza.

Roldanillo

$$\text{Precisión (z)} = 1.9600 * \text{RMSE (z)}$$

$$\text{Precisión (z)} = 1,9600 * 0,216 = 0,460 \text{ m}$$

“Comprobado para 0,460 m de precisión vertical con un nivel de confianza del 95%”. Es decir que el 95% de las alturas en el conjunto de datos tendrá un error con respecto a la altura de tierra verdadera que será igual o menor a la precisión reportada.

$$\text{Precisión (z)} = 1,9600 * 0,104 = 0,204 \text{ m}$$

“Comprobado para 0,204 m de precisión vertical con un nivel de confianza del 95%”. Es decir que el 95% de las alturas en el conjunto de datos tendrá un error con respecto a la altura de tierra verdadera que será igual o menor a la precisión reportada.

6.2. BATIMETRÍA

La batimetría del río Roldanillo, Zanjón de los Mudos y Quebrada el Rey se hace con el fin de complementar la información del DTM del municipio de Roldanillo, para ser fuente de información para los diferentes estudios, (Figura 6.4, 6.5 y 6.6).

Como resultado del trabajo batimétrico se obtuvo un total de 492 perfiles.



Figura 6.4. Topo batimetría Rio Roldanillo
Fuente: elaboración propia.



Figura 6.5. Topo batimetría Zanjón de los Mudos

Fuente: elaboración propia.



Figura 6.6. Topo batimetría Río El Rey
Fuente: elaboración propia.

La información batimétrica pasa por un control de calidad con el fin de detectar incongruencia, tales como cambios abruptos en el terreno que alteren el resultado de la interpolación para generación del DTM de cada cuenca. Para tal efecto se procede a generar un perfil con los puntos más bajos de cada sección (Figura 6.7). Como se muestra en la Figura 6.8 esta sigue una tendencia que asegura la congruencia en los datos.

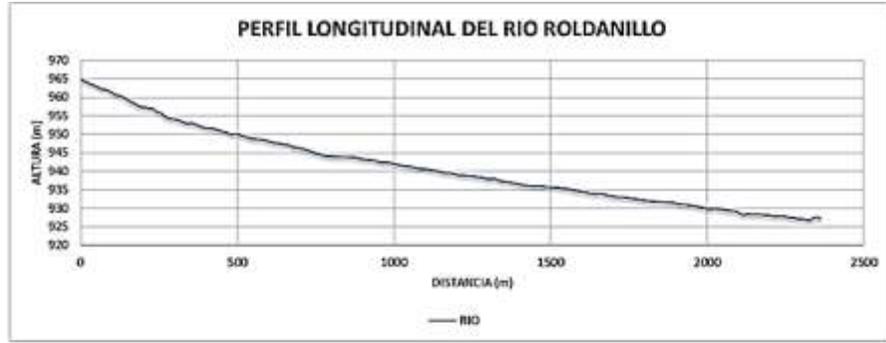


Figura 6.7. Perfiles Longitudinales Cauces Municipio Roldanillo
Fuente: elaboración propia.

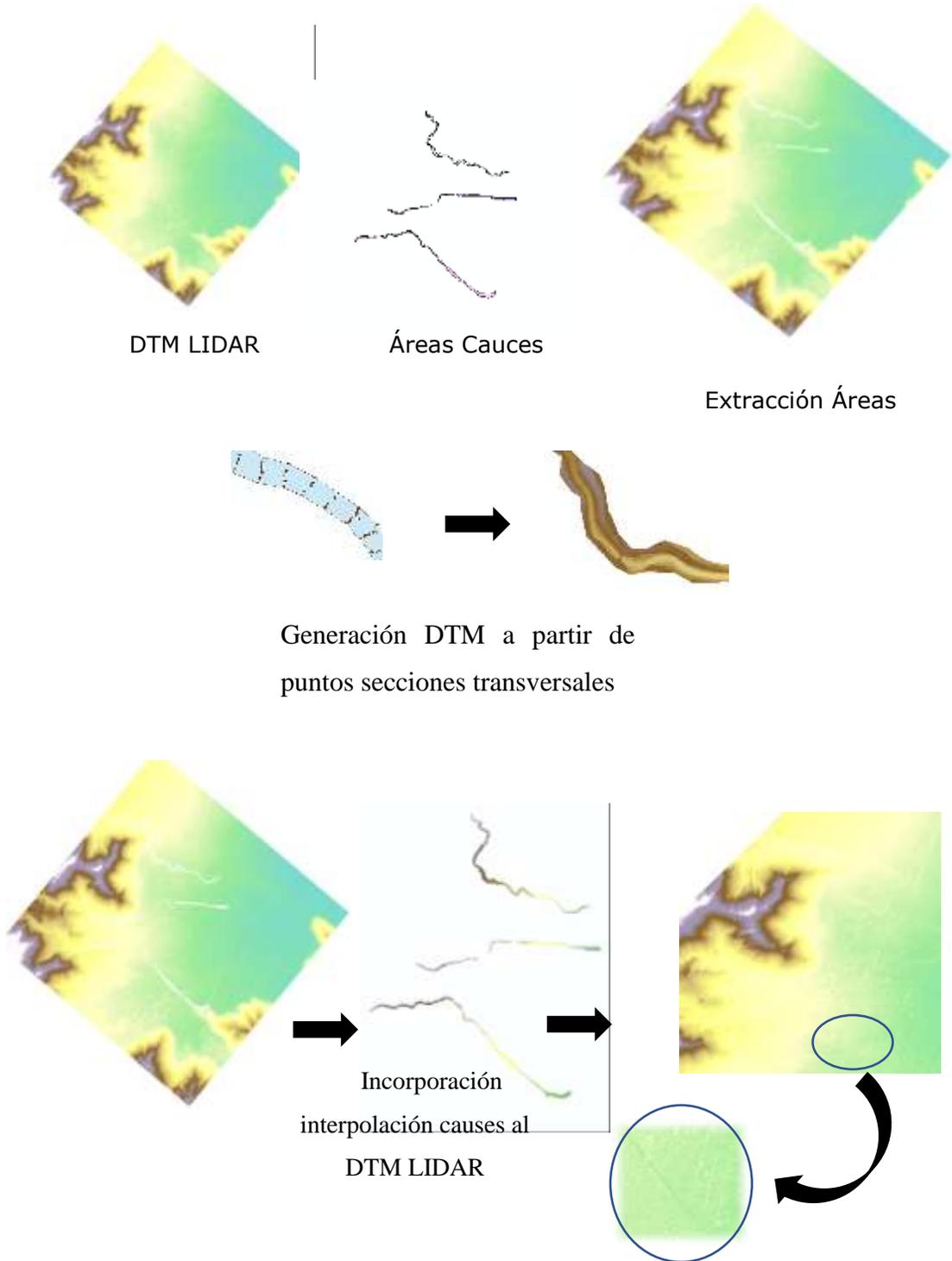


Figura 6.8. Generación de DTM y Producción de Batimetría Roldanillo
Fuente: elaboración propia.

CONCLUSIONES

Se diseñaron y aplicaron las metodologías necesarias para la de captura de datos en campo para la generación de insumos.

Dado que cada proyecto tiene sus propias particularidades se deben analizar puntualmente los requerimientos con el fin de definir los procesos más adecuados para la captura de información acorde a las especificaciones exigidas.

Se efectuó una caracterización de los diferentes productos de información requerida con sus respectivas especificaciones.

Se diseñaron y efectuaron los procesos de captura de información para todo el proyecto logrando exitosamente los productos requeridos.

REFERENCIAS

- Alcaldia-Roldanillo. (20 de Agosto de 2018). *Alcaldía de Roldanillo*. Obtenido de <http://www.rolدانillo-valle.gov.co/>
- ATKINSON, A. (2003). ESTUDIO TEORICO PARA ELCONTROL POSICIONAL EN IMAGENES DE TELEDETECCION GEORREFERENCIADAS. *Teledetección y Desarrollo Regional. X Congreso de Teledeteccion* (págs. 117-222). Caceres, España: Universidad de Extremadura.
- Casanova, M. L. (2002). *Topografía Plana*. Merida: Unversidad de los Andes.
- De Smith, M. J. (2009). *Geospatial Analysis: A comprehensive Guide to Principles, Techniques and Software Tools*. Leicester, Inglaterra: Troubador Publishing Ltd.
- Franquet, B. J. (2010). *Nivelación de terrenos por regresión tridimensional*. José María Franquet Bernis.
- Gallardo, S. J. (2014). *Batimetría de Rios, Arroyos de la Comunidad Autonoma del pais Vasco*. Ingeniería Cartográfica GAROA, S.L.
- Haining, R. P. (2003). *Spatial Data Analysis:Theory and Practice*. Cambridge, Reino Unido: Camersity Pressbridge Univ.
- IDEAM. (2013). *Metodología para realizar trabajos de hidrotopografía*. Bogotá.
- IGAC. (2016). *Especificciones Técnicas Cartografía Basica Digital* .
- Porras, V. A. (2014). Diplomado en análisis de informacion geoespacial: Tipos de muestreo. Mexico CD, Mexico: Centro publico de información CONACYT.
- SGC, S. G. (2016). *Guía Metodológica Para Estudios de Amenazas, Vulnerabilidad y Riesgo por Movimientos en Masa*. Bogotá D.C: Imprenta Nacional de Colombia.