

**ANALISIS DEL TERRITORIO, EMPLEANDO SENSORES REMOTOS COMO ALTERNATIVA A METODOS TOPOGRAFICOS TRADICIONALES, DIRECCIONADO A PROYECTOS LINEALES DE INFRAESTRUCTURA. CASO PILOTO: GASODUCTO PUENTE DOCTOR - TUCURINCA, DEPARTAMENTO DEL MAGDALENA, COLOMBIA.**

CESAR AUGUSTO QUINTERO YEPEZ

UNIVERSIDAD CATOLICA DE MANIZALES  
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA  
MANIZALES, COLOMBIA  
2016

**ANALISIS DEL TERRITORIO, EMPLEANDO SENSORES REMOTOS COMO ALTERNATIVA A METODOS TOPOGRAFICOS TRADICIONALES, DIRECCIONADO A PROYECTOS LINEALES DE INFRAESTRUCTURA. CASO PILOTO: GASODUCTO PUENTE DOCTOR - TUCURINCA, DEPARTAMENTO DEL MAGDALENA, COLOMBIA.**

CESAR AUGUSTO QUINTERO YEPEZ  
ING. CIVIL  
ESP. GERENCIA DE PROYECTOS

TRABAJO DE TESIS DE GRADO PARA OPTAR POR EL TITULO DE MAGISTER  
EN TELEDETECCION

ASESOR  
ING. FABIAN FUENTES  
MASTER EN TELEDETECCIÓN

UNIVERSIDAD CATOLICA DE MANIZALES  
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA  
MANIZALES, COLOMBIA  
2016

Nota de aceptación

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

Firma del presidente del jurado

---

Firma del jurado

---

Firma del jurado

## Dedicatoria

A los profesionales de la ingeniería, para continuar con el deseo de construir un mejor País.



## Agradecimiento

A Dios y mi Familia entera. Que con su infinito amor y apoyo incondicional contribuyeron al desarrollo de este documento.

A Promigas S.A E.S.P por apoyar la innovación y el desarrollo de nuevos talentos en beneficio de una sociedad más justa y responsable.

## CONTENIDO

1. RESUMEN.....	23
2. INTRODUCCION.....	26
2.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y PREGUNTAS DE CONOCIMIENTO.....	26
2.2. JUSTIFICACIÓN.....	28
3. OBJETIVOS.....	32
4. ESTADO DEL ARTE .....	34
4.1. ANTECEDENTE LOCAL .....	34
4.2. ANTECEDENTE INTERNATIONAL.....	39
5. MARCO TEORICO .....	57
5.1. PROCESAMIENTO LIDAR.....	57
5.2. PROCESAMIENTO IMÁGENES AEREAS Y SATELITALES .....	61
5.3. GEOLOGIA Y GEOMORFOLOGIA .....	63
5.4. HIDROLOGIA Y MODELACION HIDRAULICA .....	66
6. MARCO LEGAL.....	68
6.1. AMBIENTAL .....	68
6.2. CARTOGRAFIA.....	71
7. METODOLOGIA.....	72
7.1. LUGAR Y TIEMPO DEL ESTUDIO .....	73
7.2. INSUMOS .....	76
7.2.1. PARAMETROS DEL VUELO.....	77
7.2.2. PROCESAMIENTO GEODÉSICO .....	77

---

7.2.3. ERROR MEDIO CUADRATICO (RMSE) .....	79
7.2.4. NUMERO DE SATÉLITES .....	80
7.2.5. PDOP (POSITIONAL DILUTION OF PRECISION) .....	81
7.2.6. PREPROCESAMIENTO DE LA NUBE DE PUNTOS .....	82
7.2.7. ORTOFOTOMOSAICO .....	84
7.3. POSTPROCESAMIENTO Y EXTRACCIÓN DE INFORMACIÓN .....	86
7.3.1. MODELO DIGITAL DE ELEVACION, MODELO DIGITAL DE TERRENO Y CLASIFICACION DE NUBE DE PUNTOS LIDAR .....	86
7.3.1.1. FILTRO DE LA NUBE DE PUNTOS .....	93
7.3.1.2. CLASIFICACION DE LA NUBE DE PUNTOS Y SUBPRODUCTOS 94	
7.3.1.3. RESULTADOS Y CONCLUSIONES .....	101
7.3.2. DETECCION DE VIVIENDAS, AREA ARBUSTIVAS E INDIVIDUALIZACIÓN DE ARBOLES MAYORES A 3 METROS .....	103
7.3.2.1. DETECCIÓN DE EDIFICACIONES .....	103
7.3.2.2. DETECCIÓN DE AREAS DE ARBUSTIVAS MAYOR A 3 METROS DE ALTURA .....	113
7.3.2.3. DETECCION INDIVIDUAL DE ARBOLES .....	120
7.3.2.4. RESULTADOS Y CONCLUSIONES .....	124
7.3.5. GEOLOGIA Y GEOMORFOLOGIA .....	127
7.3.5.1. CARACTERISTICAS REGIONALES A PARTIR DE INFORMACIÓN SECUNDARIA .....	131
7.3.5.2. CARACTERISTICAS GEOMORFOLOGICAS LOCALES A PARTIR DE LA IMAGEN RRIM ( <i>RED RELIEF IMAGE MAP</i> ) .....	135

---

7.3.5.3. SPI (ÍNDICE DE FUERZA DE ESCORRENTÍA) Y CTI (INDICE TOPOGRÁFICO COMPUESTO) .....	149
7.3.5.4. RESULTADOS Y CONCLUSIONES .....	164
7.3.4. HIDROLOGIA E HIDRAULICA.....	166
7.3.4.1. CICLO HIDROLÓGICO .....	166
7.3.4.3. ANALISIS HIDROLÓGICO .....	168
7.3.4.4. MODELACIÓN HIDROLÓGICA.....	217
7.3.4.5. MODELACIÓN HIDRAULICA .....	220
7.3.4.6. RESULTADOS Y CONCLUSIONES .....	225
7.3.5. MODELACION 3D.....	227
7.3.5.1. MODELO 3D A PARTIR DE SUBPRODUCTOS.....	227
7.3.5.2. RESULTADOS Y CONCLUSIONES .....	231
8. RESULTADOS Y CONCLUSIONES .....	232
9. BIBLIOGRAFIA.....	239
10. ANEXOS .....	248

## CONTENIDO TABLAS

Tabla 1. Parámetros de vuelo.....	77
Tabla 2. Rasgos característicos de la vegetación para la información LiDAR y la imagen.....	104
Tabla 3. Tabla base para la clasificación geomorfológica.....	137
Tabla 4: Características físicas de una cuenca hidrográfica.....	177
Tabla 5: Datos de Precipitación máxima anual en 24 horas.....	184
Tabla 6: Tabla Resumen medidas de tendencia central y de dispersión.....	189
Tabla 7. Valores de los coeficientes a, b, c y d para el cálculo de las curvas intensidad-duración-frecuencia, IDF, para Colombia.....	193
Tabla 8. Tabla de Intensidad-Duración-Frecuencia para la estación de El Carmen. .....	193
Tabla 9. Bandas Landsat-8.....	198

## CONTENIDO FIGURAS

Figura 1. DSM y DTM con sombras sobre Welshbury hill-fort in Gloucester, Inglaterra. Se puede observar detalles ocultos las cuales no alcanzan a identificar otros sensores de tipo pasivo. Fuente: Anbazhagan et al., 2011. ....	42
Figura 2. Modelo TIN de una superficie, se puede observar la triangulación continua la cual va a dar forma al terreno. Fuente: Shan, J. y K. Toth, 2009. ....	42
Figura 3. Aplicaciones forestales empleando tecnología LiDAR. Fuente: Maltamo et al., 2014. ....	43
Figura 4. a) mosaico RGB de una zona con presencia de cuerpo de agua. b) DSM obtenido de un LiDAR. Fuente: Carbonneau y Piegay., 2013. ....	45
Figura 5. Modelación hidráulica de socavación sobre un río. Fuente: International River Interface Cooperative, Software, 2016. ....	45
Figura 6. Dinámica morfológica de un río mediante el empleo de imágenes satelitales. Se puede observar la variación del cauce. Fuente: Fung, Fraser, y Gauthier, 1998. ....	49
Figura 7. Curvas de nivel sobre ortofoto. Fuente: Uddin, 2002.....	50
Figura 8. Mapa final de erosión para un trazado de gasoducto, se puede observar los tramos más susceptibles a erosión. Fuente: Winning y Hann, 2014. ....	54
Figura 9. Mapa de coberturas sobre el golfo de Mississippi. Fuente: Repaka et al., 2003.....	55
Figura 10. Franja seleccionada para toma de datos LiDAR y ortofotografía. Fuente: Elaboración propia, 2016. ....	74
Figura 11. Visualización en el software POSPAC de la línea de vuelo. Fuente: Promigas, 2014.....	79

Figura 12. Gráfico de error medio cuadrático, rojo: norte, azul; este, verde; altura. Fuente: Promigas, 2014.....	80
Figura 13. Gráfica de numero de satélites sobre el área de estudio para el día 02/12/14. Fuente: Promigas, 2014.....	81
Figura 14: Visualización del PDOP sobre el área de estudio para el día 02/12/14. Fuente: Promigas, 2014.....	82
Figura 15. Uso del software LPMaster para el preprocesamiento de los datos LiDAR. Fuente: Promigas, 2014.....	83
Figura 16. Ajuste de perfil de los datos LiDAR empleando el software LPMaster. Fuente: Promigas, 2014.....	83
Figura 17. Esquema distribucion cuadrícula Y Relación plancha con archivos LiDAR y Ortofotomosaico. Fuente: Elaboración propia, 2016.....	87
Figura 18. Mapas de distribución de planchas. Mapa 1 de 5. Fuente: Elaboración propia, 2016.....	88
Figura 19. Mapas de distribución de planchas. Mapa 2 de 5. Fuente: Elaboración propia, 2016.....	89
Figura 20. Mapas de distribución de planchas. Mapa 3 de 5. Fuente: Elaboración propia, 2016.....	90
Figura 21. Mapas de distribución de planchas. Mapa 4 de 5. Fuente: Elaboración propia, 2016.....	91
Figura 22. Mapas de distribución de planchas. Mapa 5 de 5. Fuente: Elaboración propia, 2016.....	92
Figura 23. Presencia de ruido sobre la nube de puntos LiDAR. Fuente: Elaboración propia, 2016.....	93

Figura 24. Imagen de segundo y tercer retorno LiDAR (Izq), Imagen de intensidad del LiDAR (Der.), Imagen de nube de puntos clasificada como "suelo"(inf.). Fuente: Elaboración propia, 2016. ....	97
Figura 25. Imagen DTM extraída de la nube de puntos clasificada como "suelo" (Der.), Imagen DSM con todas las componentes de la superficie (arboles, casas, etc.) (Izq.). Fuente: Elaboración propia, 2016. ....	98
Figura 26. Imagen de la nube de puntos clasificada en Suelo, vegetación y edificaciones. Fuente: Elaboración propia, 2016. ....	100
Figura 27. Imagen de intensidad LiDAR (Der.) Imagen nDSM con resolución espacial de 2 metros (Izq.). El blanco representa las mayores alturas de los elementos, en este caso se puede observar la vegetación y algunas líneas eléctricas. Fuente: Elaboración propia, 2016. ....	106
Figura 28. Imagen nDSM con resolución de 2 metros (Der.). Imagen nDSM después de aplicar un filtro de convolución tipo Gauss (Der.). Fuente: Elaboración propia, 2016. ....	107
Figura 29. Imagen con filtro de paso alto Canny's (izq.) zoom de la misma imagen, se puede observar un realce en los bordes de las edificaciones (Der.).Fuente: Elaboración propia, 2016. ....	108
Figura 30. Imagen segmentada de la zona de estudio, la segmentación se realizó usando la imagen aérea y la de bordes generada por Canny. Fuente: Elaboración propia, 2016. ....	110
Figura 31. Imagen segmentada y con casas clasificadas (izq.). Imagen de las casas clasificadas ocultando los bordes de segmentación. (Der.) Fuente: Elaboración propia, 2016. ....	111
Figura 32. Función de membresía empleando operadores lógicos usando la información de intensidad del LiDAR (superior.) y relación de verde (inferior.) Resultado sobre la imagen. Azul y verde son los segmentos reconocidos por el	



algoritmo, gris información descartada por el algoritmo, rojo sin información. Fuente: Elaboración propia, 2016. ....	114
Figura 33. Imagen con vegetación Clasificada después de aplicar funciones de membresía. Fuente: Elaboración propia, 2016. ....	116
Figura 34. Imagen clasificada antes y después de relleno (izq y der.) Fuente: Elaboración propia, 2016. ....	117
Figura 35. Imagen de coberturas clasificadas por alturas en ecognition. Fuente: Elaboración propia, 2016. ....	118
Figura 36. Comparación de suavizado de contornos en los polígonos clasificados. Fuente: Elaboración propia, 2016. ....	119
Figura 37. (A). nDSM suavizado. (B.) Primera segmentación. (C.) Densificación de la segmentación (D.) Resultados aplicando local máxima (E.) centroide polígonos local máxima. Fuente: Elaboración propia, 2016. ....	121
Figura 38. Las imágenes con posición a 90° pero cambiando su posición A. 90°. B. 180°. C. 270°. D.360°. Se puede observar cómo cambia la percepción de relieve en la zona. Fuente. Elaboración propia, 2016. ....	128
Figura 39. Imagen de amplitud abierta y cerrda (izq.) Imagen de amplitud abierta (der. sup.) y cerrada (der. inf.). Fuente: Chen, Lin, Chen, He, y Fei, 2015 y Elaboración propia, 2016. ....	129
Figura 40. Imagen <i>Hillshade</i> DSM (sup.) Imagen RRIM (inf.) si se hace la comparación, desaparecieron las sombras por lo que se refleja las geoformas del terreno de forma limpia. Los valores altos están en blanco y los bajos en oscuro. Fuente: Elaboración propia, 2016. ....	130
Figura 41. Rio Toribío y Cordoba . Fuente: Promigas, 2014. ....	134
Figura 42. Imágenes de análisis del terreno. (izq.) geoformas (cent.) drenajes (der.) pendientes. Fuente: Elaboración propia, 2016. ....	141

Figura 43: Visualización del terreno entre las abscisas km10+000 y km 20+000, obsérvese cauce de río con su plano de inundación y drenajes artificiales sobre la superficie. Fuente: Elaboración propia.....	142
Figura 44. Visualización del terreno entre las abscisas km 20+000 y km 30+000, obsérvese cauce de río y drenajes artificiales y naturales sobre la superficie. Fuente: Elaboración propia, 2016.....	144
Figura 45. Visualización del terreno entre las abscisas km30+000 y km 40+000, obsérvese cauce de río con sus terrazas y plano de inundación, drenajes artificiales y naturales sobre la superficie. Fuente: Elaboración propia, 2016.....	145
Figura 46. Visualización del terreno entre las abscisas km 40+000 y km 50+000 se observa colinas convexas paralelas híbridas y procesos erosivos en sus drenajes. Fuente: Elaboración propia, 2016.....	147
Figura 47. Imagen de pendiente del terreno y geometría del cálculo de la pendiente. Fuente: Elaboración propia, 2016; Esri, 2016.....	150
Figura 48. Imagen de orientación y diagrama de orientación. Fuente: Elaboración propia, 2016; Esri, 2016.....	151
Figura 49: Ilustración del llenado de espacios. Fuente: Esri, 2016.....	152
Figura 50. Imagen de dirección de flujo y diagrama. Fuente: Elaboración propia, 2016; Esri, 2016.....	153
Figura 51. Imagen con líneas de drenaje y microcuencas después del procesamiento. Fuente: Elaboración propia, 2016.....	154
Figura 52. Tipo de curvatura de perfil. Fuente: Esri. 2016.....	157
Figura 53. Tipo de curvatura de plano. Fuente: Esri, 2016.....	157
Figura 54. Imagen de curvatura de perfil y de plan respectivamente. Fuente: Elaboración propia, 2016.....	158

Figura 55. Imagen donde muestra las zonas con mayor susceptibilidad de erosión en función de su pendiente y drenaje. Fuente: Elaboración propia, 2016. ....	159
Figura 56. Imagen donde muestra las zonas con mayor susceptibilidad de retención de humedad en función de su pendiente y drenaje. Fuente: Elaboración propia, 2016.....	161
Figura 57. Imagen que combina los índices SPI y CTI. Fuente: Elaboración propia, 2016.....	162
Figura 58. Imagen de modelo digital del terreno con el área de interés, obsérvese los pixeles sin información sobre la Ciénaga y el Mar (izq.) Imagen procesada aplicando técnicas de relleno por vecinos más cercanos (der.). Fuente: Elaboración propia, 2016.....	171
Figura 59. Imágenes que obtienen durante el procesamiento del modelo digital de terreno hasta obtener los drenajes. De arriba hacia abajo: DTM, Orientación, Dirección de flujo, Líneas de corriente. Fuente: Elaboración propia, 2016. ....	172
Figura 60. Imagen del punto de interés y la delimitación de la cuenca agua arriba. Fuente: Elaboración propia, 2016.....	173
Figura 61. Ubicación de las estaciones Pluviométricas usadas en el Estudio. Fuente: IDEAM, 2016.....	183
Figura 62. Formato de los datos pluviométricos. ....	184
Figura 63. Grafico de Distribución Gumbel.....	192
Figura 64. Curva IDF para la estación El Carmen. Fuente: Elaboración propia, 2016. ....	195
Figura 65. Hietograma para la estación El Carmen. Fuente: Elaboración propia, 2016.....	196
Figura 66. Imagen Landsat 8 completa en banda RGB. Fuente: Elaboración propia, 2016.....	199

. Figura 67. Imagen Landsat-8 después de aplicársele corrección atmosférica. Fuente: Elaboración propia, 2016.....	205
Figura 68. Imagen Landsat Recortada sobre el área de interés. Fuente: Elaboración propia, 2016.....	207
Figura 69. Segmentación de la imagen Landsat-8. Fuente: Elaboración propia, 2016.....	209
Figura 70. Imagen de comparación de valores espectrales para la cobertura de bosques (gris) y cultivos (azul) generado en el software ecognition. Fuente: Elaboración propia, 2016.....	210
Figura 71. Imagen de clasificación de coberturas sobre la zona de interés. Fuente: Elaboración propia, 2016.....	211
Figura 72. Imagen de Numero de curva después de procesar imagen de Suelos (izq.) y coberturas (der.).Fuente: Elaboración propia, 2016.....	215
Figura 73. Imagen de la cuenca de número de curva con sus respectivas áreas (izq.) y tabla del número de curva de la cuanca ponderado (der.) Fuente: Elaboración propia, 2016.....	216
Figura 74. Imagen del área de influencia para cada una de las estaciones por medio del método de polígonos de Thiessen y área de la cuenca. Fuente: Elaboración propia, 2016.....	217
Figura 75. Resultados de la modelación de abstracción en HEC-HMS. Fuente: Elaboración propia, 2016.....	218
Figura 76. Resultado modelación de la socavación con Nays2DH. Fuente: Elaboración propia, 2016.....	222
Figura 77. Resultado modelación de la inundación con NaysFlood, obsérvese el represamiento del flujo en el puente de la doble calzada. Fuente: Elaboración propia, 2016.....	223

Figura 78. Imagen modelo 3d en Infracworks obsérvese las líneas de drenajes y viviendas en rojo con sus atributos de altura. Fuente: Elaboración propia, 2016.	229
Figura 79. Imagen modelo 3d en Infracworks obsérvese las líneas de drenajes y viviendas en rojo con sus atributos de altura. Fuente: Elaboración propia, 2016.	229
Figura 80. Mapa de edificaciones. Fuente: Elaboración propia, 2016. ....	248
Figura 81. Mapa de alturas de zonas Arbustivas mayores a 3 metros. Fuente: Elaboración propia, 2016. ....	249
Figura 82. Mapa de árboles individuales. Fuente: Elaboración propia, 2016. ....	250
Figura 83. Mapa de geomorfología. Fuente: Elaboración propia, 2016. ....	251
Figura 84. Mapa de índices CTI y SPI. Fuente: Elaboración propia, 2016. ....	252
Figura 85. Mapa de drenajes, inundación y socavación. Fuente: Elaboración propia, 2016. ....	253
Figura 86. Mapa de trazado del gasoducto. Fuente: Elaboración propia, 2016. .	254

## **GLOSARIO**

DSM: Digital Surface Model, es un modelo de terreno con todos los elementos sobre el cómo viviendas, arboles, líneas eléctricas, etc.

DTM: Digital Terrain Model, es un modelo de terreno con filtración de todos los elementos sobre el cómo viviendas, arboles, líneas eléctricas, etc.

LiDAR: Tecnología de medición por la reflexión del láser sobre la superficie observada.

NDVI: Índice de vegetación normalizada, estimado para calcular la calidad de la vegetación a través de la medición de la reflectancia de las bandas de un sensor.

Ortofotografía: Fotografía aérea con corrección geométrica debidamente georeferenciada.

Geomorfología: Es la rama de la Geografía que se ocupa del estudio de la superficie terrestre, Tradicionalmente se ha centrado en cuestiones tales como las formas del relieve.

Hidrograma: Es un gráfico que muestra la variación en el tiempo de alguna información hidrológica tal como: nivel de agua, caudal, carga de sedimentos, entre otros.

Hietograma: Grafico que expresa precipitación en función del tiempo. En el eje de las ordenadas puede figurar la precipitación caída (mm) o bien la intensidad de precipitación (mm/hora).

Unidad de mapeo inercial (IMU): Es un dispositivo electrónico cuyo objetivo es obtener mediciones de velocidad, rotación y fuerzas gravitacionales en forma autónoma. Se utilizan como componentes fundamentales en los sistemas de navegación de barcos, aviones, helicópteros, misiles o cualquier móvil en que sea necesario estimar estas mediciones, sin la posibilidad de utilizar referencias externas o mediciones directas.

Rocas metamórficas: cuando las rocas se somete a intensas presiones y temperaturas sufre cambios en sus minerales y se transforma en un nuevo tipo llamada metamórfica.

Cuarzo dioritas: Mineral compuesto por dióxido de silicio o sílice, distribuido por todo el mundo como componente de rocas o en forma de depósito puro. Se utiliza con profusión en las fábricas de vidrio y de ladrillo silito o como cemento y argamasa.

Batolito: Masa de rocas magmáticas cuya superficie de afloramiento suele ser de decenas a miles de kilómetros cuadrados.

Depósitos fluviales. El caudal de un río está integrado además de agua. Por sólidos como piedras, tierra y arena entre otros materiales, los cuales dependiendo de su tamaño viajarán de una u otra forma el material más fino estará suspendido en el agua durante largos trayectos, el material más pesado viajará como carga de fondo que migra en la dirección del cauce o dando saltos sobre el lecho. Durante un determinado período de tiempo en diferentes sectores del cauce se depositarán los materiales arrastrados por el río. Con el paso del tiempo el cauce puede cambiar dejando el material depositado en su antiguo lecho, estos son los llamados depósitos aluviales, la evolución de los ríos es un proceso lento que generalmente no es percibido por el ser humano.

Depósitos Lacustres. La superficie de la tierra se transforma constantemente por efectos de la erosión. Ocasionada por la acción del viento y el agua o por eventos catastróficos como deslizamiento, Avalanchas y represamiento entre otros. Cuando la tierra rueda o es transportada por los ríos y quebradas y se deposita en el fondo de los lagos, se denomina depósito lacustre.

Depósito fluvio Lacustre. La interacción de los procesos anteriores es lo que da origen a los depósitos fluvio lacustres.

Rocas híbridas: Hay tres tipos de rocas: Rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias. Las rocas híbridas son aquellas que han pasado por al menos dos de estos procesos.

Foliación: Disposición en láminas que adquiere la materia que forma ciertas rocas cuando estas se ven sometidas a grandes presiones. Este rasgo se da cuando se produce metamorfismo.

Diaclasas: Son fracturas en las rocas que no presentan desplazamiento transversal que sea detectable, sólo manifiestan un poco de movimiento extensional. Las que se originan durante el enfriamiento de una roca magmática.

Lodolitas: Roca sedimentaria constituida por minerales de arcilla. Estas rocas guardan similitud con las pizarras arcillosas en cuanto a su carencia de plasticidad, cohesión y bajo contenido de agua. Carecen de fisibilidad en el plano de estratificación.

Procesos denudativos: Se denomina al proceso que separa la parte superior de la superficie terrestre por un agente natural como el agua, viento, cambios de temperatura, gravedad, o por el hombre.



Efecto de retro dispersión: Es la reflexión de ondas, partículas o señales en dirección hacia el lugar de donde provienen.

Lluvias Convectivas: Cuando una masa de aire próxima a la superficie del terreno aumenta su temperatura, la densidad disminuye y la masa de aire trata de ascender y de ser reemplazada por otra masa de aire más densa.

Lluvias Orográficas: Resultan de la ascensión mecánica de corrientes de aire húmedo con movimiento horizontal cuando chocan barreras naturales, tales como montañas.

Lluvias Convergencia: Son de tres tipos, la primera es la convergencia propiamente dicha, la cual se presenta en el caso en que dos masas de aire de aproximadamente la misma temperatura, que viajan en dirección contraria, se encuentran a un mismo nivel. El choque entre las dos masas de aire hace que ambas se eleven. La segunda, el ciclón, es una masa de aire circular con baja presión que gira en el sentido contrario al de las manecillas del reloj en el hemisferio norte. Tiene en su centro el “ojo del ciclón”, en el cual la presión es baja comparada con la masa de aire. Funciona, entonces como una chimenea, haciendo subir el aire de las capas inferiores. El anticiclón es una zona de alta presión circular, que gira en el sentido de las manecillas del reloj en el hemisferio norte.

Estación pluviométrica: Es la estación que se encarga de medir la cantidad de lluvia precipitada.

Imágenes multiespectral: Imagen espectral es aquella que reproduce la figura de un objeto en función de la longitud de onda que esté reflejando (o emitiendo) el objeto en cuestión; o dicho de otro modo, es un set de imágenes del mismo objeto representadas cada una de ellas con diferentes longitudes de onda. Generalmente de 3 a 20 longitudes de onda.

Corrección atmosférica: Procedimiento de desplazamiento de los histogramas de las bandas de una imagen para eliminar el efecto producido por la radiación difusa de la atmósfera.

## 1. RESUMEN

El proyecto tiene como objetivo analizar el territorio mediante la aplicación de métodos empleando el uso de sensores LiDAR, imágenes aéreas y satelitales para la evaluación de infraestructura en trazados de gasoducto en comparación con la topografía convencional con respecto a su volumen de información, ahorro en tiempo y nivel de detalle. Desde el sitio de Puente Doctor hasta Tucurinca, ubicados en la zona norte del departamento del Magdalena.

La zona de influencia del proyecto se ubica en el norte de Colombia iniciando en un punto ubicado entre las ciudades de Ciénaga y Santa Marta sobre el sector conocido como Puente Doctor, departamento del Magdalena. Y finalizando en un sitio cercano al pueblo de Tucurinca, igualmente perteneciente al departamento del Magdalena. La zona de estudio tiene una dimensión de cincuenta (50) kilómetros de largo por 600 metros de ancho para un total de 30 km<sup>2</sup>.

En la actualidad, en el transcurso del desarrollo de un proyecto de gasoducto, se identifica algunas limitaciones en la recopilación de información durante la etapa de factibilidad, esta dificultad está asociada por los métodos de captación de información primaria como la topografía convencional y el uso de datos provenientes de fuentes secundarias, como mapas, los cuales tienen poca o nula información como geomorfología, tipos de suelo e identificación de drenajes de escorrentía y ríos debido a su gran escala.

Aunque se ejecutan recorridos mediante comisiones de campo apoyado en sistemas GNSS y navegador, muchas veces surgen impedimentos en la obtención de los permisos de ingreso por ser propiedad privada, lo que imposibilita la verificación de las coberturas. Adicionalmente, existe poco detalle del terreno a debido a la poca densidad de puntos topográficos, a esto hay que agregarle el ancho

de la franja de interés la cual es muy limitada, y la cantidad de obstáculos que se puedan encontrar en la zona, lo que se traduce en mayores tiempo de toma de información y de procesamiento.

Por lo tanto, para realizar una mejor evaluación de trazados para los gasoductos y dar un salto cualitativo y cuantitativo en la etapa de factibilidad con información de alta precisión y confiabilidad. Se empleó el uso de sistemas LiDAR, imágenes aéreas y satelitales.

Estas imágenes son el insumo primario para aplicar metodologías de procesamiento y extraer diversas características del terreno. En el presente estudio se aplicaron técnicas de clasificaciones por objetos sobre la imagen aérea de 10cm y la nube de puntos usando el software Global mapper y ecognition, permitiendo proceder en la asignación de clases sobre los puntos y posterior generación de algoritmos de segmentación, detección de bordes, identificar y caracterizar las coberturas como zonas arbustivas con altura mayor a 3 metros, individualización de árboles e identificación y clasificación de las viviendas con su atributo de altura.

Del LiDAR se generaron derivados como modelos de elevación de superficie (DSM) y modelos de elevación de terreno (DTM), los cuales a su vez, son insumos para aplicar la técnica RRIM (*Red Relief Image Map*) cuya principal aporte consiste en resaltar el terreno con los mismos atributos de profundidad de un '*hillshade*', pero con la ventaja de eliminar las sombras, lo que deja al descubierto información oculta, ideal para la caracterización geomorfológica. Además de calcular las líneas de escorrentía y los índices SPI (fuerza de escorrentía) y CTI (topográfico compuesto) empleando el software Arcgis siendo útil en el reconocimiento de zonas susceptibles a erosión y saturación en función de su pendiente.

Para la modelación hidrológica e hidráulica, hay que tener en cuenta que este es un proceso de varias etapas y las cuales depende, en parte, de la información

geoespacial generada a partir de imágenes satelitales. Dentro del proceso, se destaca la modelación hidrológica en el cálculo de los caudales por métodos de transformación empleando el software HEC-HMS basado en los datos de las estaciones pluviométricas, el número de curva a partir de las coberturas extraídas de una imagen Landsat-8 empleando índices como el NDVI y cuencas medianas extraídas de modelos digital de elevación de una imagen radar Alos-Palsar.

La modelación hidráulica depende de los datos hidrológicos, siendo el principal dato de entrada el caudal y apoyado en la nube de puntos se elabora el modelo de terreno. Estos datos se cargan en el software IRIC y se define los parámetros hidráulicos con el propósito de correr la simulación de los fenómenos de socavación e inundación.

Finalmente se origina un modelo 3D en *Infraworks* de Autodesk. El cual permite visualizar la topografía del terreno, las viviendas con su atributo de altura y las líneas de escorrentía. Siendo esta la información de interés para los involucrados en las diferentes áreas de este tipo de proyectos. Lo que facilita su interpretación, disminuyendo la incertidumbre y facilitando la toma de decisiones.

## **2. INTRODUCCION**

### **2.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y PREGUNTAS DE CONOCIMIENTO**

La evaluación de los proyectos de infraestructura energética se compone de varias etapas para medir su factibilidad. Dentro de las metodologías aplicadas, se incluyen labores de preselección de rutas por medio de visores geográficos y las respectivas salidas de campo en la zona perteneciente al trazado previamente seleccionado. Estos trabajos se realizan tomando en cuenta las principales variables que representan el mayor impacto socio-económico dentro del proyecto, lo que permite medir la factibilidad del trazado seleccionado para su posterior construcción.

Sin embargo, la información recopilada no siempre es suficiente debido a la limitación del área de la zona de estudio, es decir, el ancho de la franja del posible recorrido del gasoducto es muy estrecho y puede variar entre los 20 y 50 metros en ambos lados a partir del eje. En esta etapa de prefactibilidad, las mediciones topográficas en campo se hacen de forma ligera, por lo tanto son susceptibles a generar vacíos en la calidad y cantidad de información disponible. Debido a esta limitante y en caso de no ser factible el trazado, debe realizarse nuevamente el trabajo de campo, lo que incrementaría el consumo de recursos de tiempo y dinero. Igualmente sucede con la información de tipo predial, cobertura y usos de suelo. Independientemente de los datos del propietario, muchas veces surge la imposibilidad de identificar y/o realizar mediciones de la zona de estudio, por la negación de los permisos de ingreso. Lo que exige planear una nueva visita al terreno. La coordinación de las autorizaciones de acceso es algo muy importante ya que la no obtención de estos afecta los estudios de tipo hidrológico e hidráulico. Finalmente con respecto a la geomorfología, simplemente no se ejecutan estudios

sobre este. Sin embargo, se realizan análisis geotécnicos mediante sondeos y apiques los cuales brindan muy valiosa información de las propiedades geomecánicas del suelo para el diseño.

Por lo tanto, se puede observar que cuando no existen suficientes elementos de juicio para una apropiada toma de decisiones, los riesgos del proyecto se incrementan e impactan en el presupuesto de las etapas posteriores.

En la literatura consultada, se han encontrado algunas referencias que integran el uso de la tecnología LiDAR, fotografías aéreas y satelitales para estudios de trazados de infraestructura. En especial el primero, con la ventaja de que el sensor puede ser instalado en plataforma aérea o terrestre, además de la aplicación de técnicas de procesamiento para generación el DTM (*Digital Terrain Model*), DSM (*Digital Surface Model*) y clasificación de nube de puntos, cuya utilidad radica en generar insumos primarios por medio de técnicas de extracción de información manejando índices como (índice de vegetación de diferencia normalizada) o GLI (*Green Leaf Index*), filtros como el Laplaciano y método RRIM (*Red Relief Image Map*) por mencionar algunos. ( [Felgueiras y Goodchild, 1995](#); [El-Sheimy et al. 2005](#); [Graham, 2009](#); [Jie y Aparajithan, 2009](#); [Shan y K. Toth, 2009](#); [Petrie y Toth, 2009](#); [Heritage y Large, 2009](#); [Chen et al. 2015](#)). No obstante, en la práctica se omite el uso de imágenes proveniente de otros sensores que pueden brindar información importante para otras áreas del conocimiento (geología, hidráulica, etc.) y las cuales están fuertemente involucradas en los proyectos; por lo que no se encontró información integrada para el desarrollo de infraestructura de gasoductos que ayuden en la toma de decisiones para su diseño y construcción. A pesar de ello, se debe continuar en los esfuerzos de generar puntos de convergencia en la información que permita añadir nuevas variables para la evaluación de los proyectos de infraestructura. En este caso, trazados de diferentes sistemas de transporte.

Tomando en cuenta las limitaciones anteriormente mencionadas, es imperioso incrementar el detalle del nivel de información pero al mismo tiempo reducir tiempos, ampliar el área de estudio, aumentar el volumen de datos y mejorar los métodos de medición involucrando nuevas variables apoyados en sistemas de sensoramiento remoto para una adecuada evaluación de factibilidad de infraestructura. Lo que lleva a plantear la siguiente pregunta: ¿Qué volumen de información, ahorro en tiempo y nivel de detalle se puede obtener empleando metodologías de procesamiento sobre los datos de los sensores remotos en comparación con un levantamiento topográfico convencional y como contribuye en el análisis del territorio para la evaluación de infraestructura en trazados de gasoducto?

## **2.2. JUSTIFICACIÓN**

Actualmente Colombia vive un auge económico importante que le ha permitido destacarse como uno de los países de mayor expansión a nivel regional. Esta dinámica es reflejo de la gestión de los diferentes actores empresariales que pertenece a cada uno de los renglones productivos de la económica colombiana. Y para mantener un crecimiento sostenido, es importante garantizar el flujo continuo de las fuentes de energía hacia los sitios de producción. Una de estas fuentes es el gas, el cual se transporta por una serie continua de tuberías ya sean subterráneas, subfluviales o aéreas llamadas gasoductos. Este recurso natural juega un papel importante en la economía de la costa caribe debido al gran uso de tipo industrial, comercial y a nivel de hogar que se le da en los grandes centros urbanos. Sin embargo, es necesario expandir y/o incrementar la oferta de energía hacia nuevos mercados mediante la construcción de nuevas líneas de gasoductos y fortalecer los existentes teniendo en cuenta los parámetros de seguridad, menor afectación ambiental y social para mejorar el nivel de competitividad del país; así como contribuir al desarrollo de las zonas poblacionales pequeñas o apartadas y mejorar la calidad de vida de sus habitantes.



Hoy día en la evaluación de los potenciales trazados de redes de gasoductos en la empresa PROMIGAS S.A E.S.P en su etapa de prefactibilidad, existe un componente inicial donde se funda en la observación de los hechos mediante el aprovechamiento de visores geográficos gratuitos disponibles en el mercado, tomando como línea base algunos criterios de selección como coberturas y tipos de suelo. No obstante, es necesario el apoyo de otras áreas de la empresa, como por ejemplo, el personal de mantenimiento y construcción, los cuales se encargan de ejecutar las labores de integridad de las redes existentes y construcción de nuevas redes con la ventaja de que conocen (por lo general) la zona de influencia de las líneas de gasoducto pero cuyo conocimiento se limita a la observación empírica acerca de la topografía y características del terreno. En caso de no contar con dicho conocimiento, se realiza la contratación externa de empresas especializadas en proyectos de infraestructura, con la limitante de que son empresas que emplean técnicas tradicionales de levantamiento como topografía por sistemas GNSS. Además, es muy probable que la información recolectada omite ciertos detalles que no pueden ser levantados por cuestiones de tiempo y que probablemente sean importantes a la hora del diseño. Si se decide que es viable el proyecto, se procede a la recopilación a mayor detalle y con personal capacitado sobre una franja determinada no superior a 60 metros de ancho, el problema es que el estudio sólo tiene información de dicha franja. Por lo tanto, si no es viable el trazado, se debe reiniciar el proceso.

Tomando en cuenta la descripción del proceso de selección del recorrido del gasoducto, sale a relucir el uso de sensores remotos para la evaluación de las potenciales rutas debido al nivel de detalle y mayor volumen de información del terreno, lo que contribuiría a un mejor análisis del mismo y realización del trazado, disminuyendo los riesgos asociados a dificultades no previstas, reducción de tiempos y mejor toma de decisiones.

El uso de la teledetección o sensoramiento remoto brinda información, confiable, precisa y a gran escala del sitio de interés, reduciendo las salidas de campo. Algo que no es posible mediante otras técnicas tradicionales como por ejemplo: levantamiento topográfico con estación total y/o sistema GNSS.

Las técnicas de teledetección permiten la identificación de nuevos parámetros y mantener un mayor control de la información para la evaluación de trazados de gasoductos. Una propuesta con gran potencial es el uso de la tecnología LiDAR (*light detection and ranging*) de plataforma aérea el cual es un sensor laser con su propia emisión de energía a una longitud de onda constante. El método consiste en medir las pulsaciones del escáner láser mediante un localizador de pulsaciones ubicado sobre la plataforma, apoyado por receptores GNSS y sistemas de navegación inercial INS. Mediante el uso de software especializado, la información generada se expresa en nube de puntos donde se puede reflejar las alturas y la topografía de la zona con un gran detalle, siendo este su principal producto. Este producto es de gran importancia debido al uso interdisciplinar que se le puede dar. Sustrayendo otra cantidad de subproductos relevantes para la evaluación de trazados. Por ejemplo, extraer los productos DSM (*digital Surface model*) o el DTM (*digital terrain model*) con aplicación en hidrología, hidráulica donde sirve como insumo primario para determinar los parámetros morfológicos de cuencas, geomorfología y topografía permitiendo generar información acerca de las líneas de flujo, escorrentía, modelos de inundación, geoformas terrestres, tipos de pendiente y curvas de nivel del terreno por mencionar algunas. Otra ventaja del LiDAR es que puede integrarse con un sensor fotográfico para generar fotografías de alta resolución espacial lo cual contribuye en la generación de modelos 3D.

Finalmente hay que resaltar que toda esta información puede ser utilizada como línea base para la elaboración de mapas de cambios de cobertura y uso de suelo mediante análisis multitemporal con futuros levantamientos posibilitando estimar

impactos generados por el gasoducto posterior a su construcción o estudiar el crecimiento urbano de cierta población.

Por lo tanto, el beneficio social para el uso de la tecnología LiDAR es que se podrá contar con información altamente detallada de la zona de estudio y estimar las áreas de afectación como cultivos, zonas urbanas y áreas de bosque protegidas para su posterior indemnización y/o compensación. Servirá como insumo base para cuantificación de viviendas y tendencia de crecimiento de las zonas de expansión urbana comparando con otras fotografías de anterior fecha de la misma área de observación además de determinar y cuantificar los riesgos de índole hidrológicos, geomorfológicos, ambientales y sociales. El uso de la información sería amplio para las diferentes áreas que componen la empresa y para otros tipos de estudios de su interés.

En resumen, para realizar una mejor evaluación de rutas y dar un salto cualitativo y cuantitativo en la etapa de prefactibilidad que permita contar con información de alta precisión y fiabilidad para la etapa de factibilidad. La propuesta del uso de sistemas LiDAR es una herramienta innovadora y útil donde se pretende ampliar la información geomorfológica, expansión urbana por análisis multitemporal de fotografías aéreas, usos y coberturas de suelo. Ampliando la frontera del conocimiento con respecto al volumen y calidad de la información a la hora de medir los impactos sociales, económicos y medio ambientales del proyecto.

### 3. OBJETIVOS

#### GENERAL

Analizar el territorio empleando metodologías aplicadas sobre datos obtenidos por medio de sensores remotos en comparación con métodos tradicionales topográficos con relación a su volumen de información, ahorro en tiempo y nivel de detalle para la evaluación de trazados de gasoducto.

#### ESPECIFICOS

- Generar el modelo digital de terreno (DTM) y modelo digital de superficie (DSM) a partir de la clasificación la nube de puntos LiDAR como insumos primarios para los procesos de coberturas, geomorfología, hidrología e hidráulica.
- Calcular la cantidad de viviendas, delimitar las coberturas arbustivas y conteo individual de árboles mayores a 3 metros empleando la clasificación de la nube de puntos LiDAR, ortofotomosaico, DTM y DSM para propósitos de adquisición y compra, definición de la afectación de zonas arbustivas ambientalmente sensibles y cálculo de compensación forestal.
- Identificar características geomorfológicas empleando la imagen RRIM (*Red Relief Image Map*), modelo digital de terreno (DTM), apoyado en el cálculo las líneas de escorrentía e índices SPI (índice de fuerza de escorrentía), CTI (índice topográfico compuesto) para análisis indirecto de tipo de suelo e identificación de zonas menos expuestas a eventos de inundación y socavación.

- Modelar la socavación e inundación de una cuenca calculando el caudal de escorrentía para un tiempo de lluvia de 24 horas con un periodo de retorno de 100 años apoyado en imágenes satelitales y modelos digitales de terreno (DTM) empleando métodos hidráulicos e hidrológicos.
- Generar modelo 3D mediante el empleo de modelo digital de terreno (DTM), ortofotomosaico y capas temáticas extraídas de los datos LiDAR para efectos de visualización dirigido al público general no técnico.
- Comparar la información proveniente de los resultados de los sensores remotos con la topografía convencional desde el punto de vista de volumen de información, ahorro en tiempo y nivel de detalle.

## **4. ESTADO DEL ARTE**

### **4.1. ANTECEDENTE LOCAL**

Hoy día en la evaluación de los potenciales trazados de redes de gasoductos en la empresa PROMIGAS S.A E.S.P se divide principalmente en tres etapas: etapa de exploración, prefactibilidad y factibilidad.

En la etapa exploratoria se preselecciona las posibles rutas usando visores geográficos tomando en cuenta el tipo de cobertura existente y los DTM disponibles a una resolución espacial de 90 metros. Estos trazados se realizan en base a los principales criterios como la menor afectación de poblaciones, áreas cultivables, cruces de cuerpos de agua y cruces de vías. La ruta que presente la menor afectación será la seleccionada para realizar las respectivas labores de campo, correspondiente a la etapa de prefactibilidad. En esta etapa, se incluye la verificación de los criterios del trazado seleccionado. Adicionalmente, se incluye nuevas variables como tipo de suelo, topografía, predios y viviendas rurales, las cuales son realizadas por personal externo, y donde se consigna los rasgos más característicos del área de estudio en formatos para su posterior análisis. Por lo tanto, si en esta etapa se comprueba de forma un poco más detallada la menor cantidad de afectación se procede a la etapa de factibilidad donde se hace estudios más profundos y con personal capacitado para medir los impactos ambientales y socio-económicos, esta etapa es la última antes de iniciar la construcción. Sin embargo, si dicha evaluación no es factible de acuerdo a la autoridad ambiental (en este caso el ANLA – Agencia Nacional de licencias Ambientales -). Se debe seleccionar una nueva ruta e iniciar todo el proceso nuevamente; consumiendo más recursos de tiempo y dinero.

Ante la situación anteriormente descrita y analizando las diferentes etapas, se puede identificar algunas dificultades, específicamente en prefactibilidad:

1) Sólo es posible de adquirir información de la ruta seleccionada. Debido a que el análisis de coberturas se realiza a pie y/o en vehículo cuando existen accesos, sólo se recopila los detalles más destacados del recorrido.

2) Con respecto a la información geomorfológica, drenajes y tipos de suelo, en la etapa de prefactibilidad se realizan contrataciones externas, donde al igual que el anterior punto, se recopila los detalles más destacados identificables siguiendo el recorrido del trazado.

3) Para las características topográficas y urbanas, sólo existe un área pequeña alrededor del corredor seleccionado, el uso de métodos de levantamiento convencionales son lentos y con poco detalle debido al alto volumen de la información a levantar, igualmente la expansión urbana se deduce en base a información de los habitantes de la zona o la escasa información cartográfica disponible.

4) Sólo es posible seleccionar una nueva ruta en caso de que la actualmente evaluada, presente gran dificultad en el trazado. Esta dificultad radica en la información sobre la cual se tomó la decisión, y cuya raíz es porque imposibilita hacer una comparación equitativa con otro trazado debido a que sólo existe datos de campo de un trazado (solo una alternativa presenta topografía). Por lo tanto, si se desea hacer un análisis comparativo con condiciones más parejas, es necesario obtener información de una nueva ruta, exigiendo nuevamente más tiempo y dinero.

Entonces, para ampliar los márgenes de obtención de datos del terreno así como su volumen y calidad con el propósito de generar mayores elementos de juicio a la hora de tomar decisiones. Se propone el uso de las nuevas tecnologías para la

adquisición de información remota y que han presentado un avance espectacular en los últimos años. Estos avances incluyen desde la invención del láser en los años 60, pasando por la fotografía digital, hasta llegar a la tecnología de georreferenciación por satélite en los años 90.

Para el presente estudio se propone emplear principalmente la tecnología LiDAR, fotografías aéreas, satelitales y software GIS y CAD. Se ha revisado la literatura local para identificar antecedentes, pero no fue posible encontrar investigaciones que empleen el uso de estas tecnologías para el diseño de gasoductos. No obstante si se ha aplicado para otro tipo de infraestructura como corredores viales, tal como lo describe [Lemos, \(2012\)](#). Donde el Instituto Nacional de Vías (INVIAS) bajo la imperiosa necesidad de mejorar la infraestructura vial de Colombia mediante el planteamiento de estrategias efectivas en tiempo y costos, tanto en la elaboración de los estudios y diseños como en la ejecución de las respectivas obras, concluyó que la tecnología LiDAR cumplía con estos requisitos, siendo aplicada a diversos proyectos viales como son los de AGUACLARA – OCAÑA – SARDINATA–ASTILLEROS - CÚCUTA RUTA 70 - NORTE DE SANTANDER. Una vez procesada toda la información recolectada, se generan los productos finales para entrega como Modelo Digital de Terreno (DTM), modelo digital de superficie (DSM), Ortofotomosaico con tamaño de píxel de 10 cm, Restitución en 2D y 3D del corredor levantado, finalmente se genera cartografía temática para su análisis. Otro ejemplo en la aplicación de infraestructura vial es la expuesta por [Gómez et al., \(2010\)](#). Al igual al anterior artículo, se genera los mismos derivados de la nube de puntos pero con una agravante y es el aprovechamiento del DTM para la generación de curvas de nivel que representen de forma adecuada el terreno y posteriormente ingresarlo a programas CAD para proceder con el diseño geométrico del corredor vial permitiendo calcular de forma muy precisa las curvas verticales, horizontales y los volúmenes de tierra para efectos de presupuesto. En comparación con otras alternativas “Los elementos más importantes para el uso de determinada tecnología son la precisión obtenida, rendimiento y costos. Si se realiza un levantamiento



topográfico con los métodos tradicionales (estación total) se pueden obtener precisiones máximas de 1: 50000, rendimientos promedio de un kilómetro diario con franjas de 100 metros y levantando puntos con cuadrículas de aproximadamente 20 metros de lado con costos relativamente bajos. En cambio LiDAR es la tecnología preferida en la parte alta de la escala de precisión: para aplicaciones de ingeniería, los volúmenes de movimiento de tierras, estudios de drenaje, donde las formas del terreno localizado, la penetración de la vegetación y el alto grado de la fiabilidad es necesario” (Gómez et al., 2010). Continuando en la misma línea, las aplicaciones a nivel de detalle para grandes proyectos viales ha sido considerable, como la contratada por la Agencia Nacional de Infraestructura (ANI) para realizar el levantamiento topográfico empleando LiDAR aéreo entre el municipio de Soacha y el municipio de Girardot, localizados en los departamentos de Cundinamarca y Tolima, con el fin de obtener el modelo digital del terreno (DTM) y el modelo digital de superficie (DSM), en un corredor aproximado de 151 Km. lineales, así como realizar la identificación en 2D sobre las ortofotos producidas de todos los elementos presentes en el terreno tales como, vías, edificaciones, drenajes, obras de arte, cercas, cultivos, entre otros. Lo anterior con el fin de suministrar la información requerida para el posterior desarrollo de los diseños de ingeniería de detalle [Agencia Nacional de Infraestructura, \(2015\)](#).

Un antecedente local en la aplicación del LiDAR a la parte ambiental ha sido para la estimación del volumen forestal en el parque metropolitano bosque San Carlos en Bogotá D.C. de acuerdo con [Martínez et al., \(2013\)](#). La investigación “analiza un grupo de herramientas informáticas para el manejo de los datos LiDAR y posteriormente, se establece un procedimiento metodológico para obtener un modelo de regresión que relacione los datos de altura normalizados, con la variable de campo de Volumen Forestal. Se realizan análisis de regresión apoyado en criterios de decisión estadísticos probando varios modelos para seleccionar las variables que mejor representen el fenómeno, se establece la prueba de bondad de ajuste tanto del modelo como de sus parámetros.”

En lo que respecta a su aplicación hidrológica e hidráulica, el LiDAR existe un antecedente bastante interesante y es el ocurrido durante la ola invernal del año 2010 en la región de la Mojana sobre el río Cauca, cuyo mayor impacto fue la inundación de miles de hectáreas debido al rompimiento de diques de contención de agua. Por lo que el gobierno central creó el Fondo de Adaptación para la reconstrucción de la zona. Dentro del proceso se contrató “los estudios de topografía y batimetría como insumo fundamental del modelo hidrodinámico bidimensional y tridimensional, el levantamiento de la red geodésica, la construcción de una base de datos geográfica a partir de la toma e interpretación de fotografías aéreas digitales que permita evaluar elementos expuestos, y la construcción de un modelo digital de terreno a partir de los datos LiDAR y batimétricos” ([Fondo de Adaptación, 2012](#))

Aunque no se encontró mayor literatura de la tecnología LiDAR a nivel local, esto se debe interpretar como una oportunidad para la comunidad científica y profesional de abrirse a nuevos campos investigativos y aplicativos en el aprovechamiento del uso de nuevas herramientas tecnológicas en beneficio de las diferentes áreas de conocimiento.

## 4.2. ANTECEDENTE INTERNATIONAL

### **LiDAR y ortofotografías.**

Desde su introducción en los años 60, el láser ha asumido un papel central en la medición precisa de objetos en ambientes naturales. Históricamente el descubrimiento del láser inicio en los años 1958 cuando dos científicos, Charles Townes y Artur Schawlow sugirieron el potencial de una intensa radiación monocromática sobre un estrecho haz de luz puede viajar largas distancias que pueden ser precisamente direccionadas y medidas (Price y Uren, 1989). “Este principio hace parte de los sensores activos los cuales emiten su propia fuente de energía contrario a los pasivos los cuales aprovechan el sol como fuente de emisión” según B. Campbell y H. Wynne, (2011). Desde esta concepción, las posteriores investigaciones han permitido una mejora en la instrumentación para el control del haz de luz, pasando por el primer laser empleando rubí desarrollado en los 60, y luego el gran desarrollo tecnológico a partir de los años 70 donde los componentes disminuyeron de tamaño para su empleo en laboratorios y posteriormente su comercialización en una gran cantidad de aplicaciones de la vida diaria.

Una de las disciplinas que se ha beneficiado con el desarrollo tecnológico del láser es la topografía, para este campo existen varios instrumentos, como el distanciómetros cuya intensidad del láser se ubica en el infrarrojo. Este dispositivo permite obtener medidas de distancia con una precisión sorprendente, lo que contribuyó a que se convirtiera en uno de los instrumentos más demandados en poco tiempo. ¿Pero cómo funciona esta herramienta de precisión? Consiste en el empleo de un haz de luz sobre la longitud de onda del infrarrojo cercano emitida mediante una frecuencia modulada hacia un prisma fijado en el objetivo el cual refleja la señal, la diferencia de fase entre la energía emitida y la recibida arroja la distancia calculada (Heritage y Large, 2009). Estos distanciómetros, en principio,

son los que se emplean en sensores integrados muchos más robustos como el LiDAR aéreo (el cual es el empleado en el presente estudio), aunque ya no hace falta fijar un prisma sobre el objetivo porque el sensor mide la cantidad de energía reflejada sobre la superficie directamente.

Aunque son varios los tipos de sensores desarrollados, existe uno que se destaca especialmente por su componente innovador y altísimo nivel de detalle. La tecnología LiDAR (*Light Detection and Ranging*). El cual puede utilizarse en diferentes tipos de plataforma como vehículos o pequeñas naves aerotransportadas. El LiDAR es un sensor laser con su propia emisión de energía a una longitud de onda constante. Esta tecnología permite obtener en un detalle nunca antes visto, planimetría y altimetría de grandes superficies. El método consiste en “medir las pulsaciones del escáner láser mediante un localizador de pulsaciones ubicado sobre la plataforma, apoyado por receptores GPS y sistemas de navegación inercial IMU” (Shan y Toth, 2009). Donde es posible obtener georreferenciaciones incluyendo la corrección de los movimientos de la plataforma aérea como el aleteo y cabeceo mediante técnicas de calibración, además de ser cada vez más rápidas y precisas (Wehr, 2009). Los datos pueden ser observados mediante el empleo de ordenadores los cuales interpretan esta información en nube de puntos las cuales presentan una gran precisión tanto en sentido horizontal como vertical y cuyas errores en la medición pueden variar en menos de 15 cm (Charlton et al., 2003). El proceso de la obtención de la información LiDAR se divide en dos procedimientos. Aseguramiento de la calidad y control de calidad. El primero se lleva a priori al vuelo consistiendo en calibrar debidamente los equipos y generar la planeación de vuelo para su implementación sobre el sitio de interés. El segundo es el control de la calidad y se lleva a cabo posteriormente de haberse realizado el vuelo, asegurando la integridad, corrección y eliminación de errores generados. (Shan y Toth, 2009). Como se mencionó anteriormente, durante la etapa de vuelo, las pulsaciones laser son emitidas y recibidas, midiendo el tiempo de retraso del terreno al sensor, obteniéndose la información en forma de nube de puntos siendo

este el principal producto. Esta información contiene las posiciones en el espacio debidamente georreferenciadas y sus correspondientes alturas. La energía emitida por el pulso laser va perdiendo intensidad a medida que pasa por otros objetos y se acerca al terreno. Esta pérdida se refleja sobre la superficie y la cual es captada por el sensor, la capacidad de la captura de esa pérdida de intensidad se le llama “retorno”. Generalmente la pérdida progresiva de intensidad del pulso laser se da de la siguiente forma: El primer “retorno” corresponde al de la superficie, por ejemplo, la copa de un árbol. El segundo “retorno” es la energía que alcanzo a traspasar la superficie anterior y se refleja en otra. Como el tronco, y así sucesivamente hasta alcanzar el suelo. Este reflejo de la energía emitida por el sensor depende de la densidad y tipo de vegetación debido a que todos reflejan de una forma diferente la energía (Maltamo et al., 2014). Entre más denso sea el bosque, más difícil es obtener datos del suelo. Esta información se puede filtrar mediante el uso de software especializado que calcula el rango de intensidad de los “retornos”. Siendo innegable la valiosa información obtenida (Campbell y Wynne, 2011). El primer componente radica en la adquisición de la nube de puntos y con la debida ejecución de algoritmos y técnicas de filtraje, se puede hacer una clasificación de viviendas por métodos de detección de bordes empleando algoritmos Laplacianos, Gaussianos y kernels (Paine y Kiser, 2012; Richards, 2013).

Como ahora se sabe, la ventaja que radica en esta nube de puntos es su manipulación ya que se pueden generar “modelos digitales de superficie, modelos de terreno y superficies de triangulación de terreno (DSM, DTM, TIN)<sup>1</sup>” (Fleming et al., 2010). “Los primeros dos modelos geoméricamente hablando, se definen como la función continua que mapea el terreno planimétrico 2D a elevación z del mismo” (El-Sheimy et al., 2005). Y el tercer modelo representa la superficie como una cantidad continua no traslapada de triángulos unidos sobre sus lados con irregular

---

<sup>1</sup> DSM: Modelo digital de superficie.  
DTM: Modelo digital de terreno.  
TIN: Modelo triangular de superficie.

tamaño y forma permitiendo modelar en buen detalle la superficie creando texturas (Felgueiras y Goodchild, 1995; Heritage y Large, 2009).

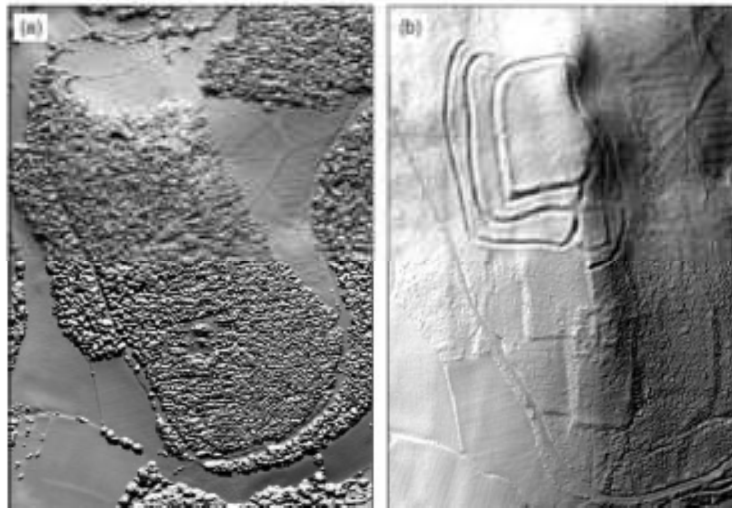


Figura 1. DSM y DTM con sombras sobre Welshbury hill-fort in Gloucester, Inglaterra. Se puede observar detalles ocultos los cuales no alcanzan a identificar otros sensores de tipo pasivo. Fuente: Anbazhagan et al., 2011.

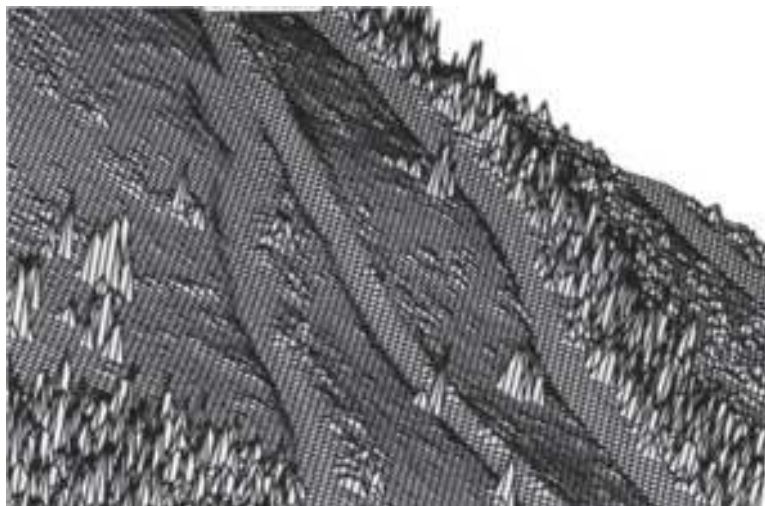


Figura 2. Modelo TIN de una superficie, se puede observar la triangulación continua la cual va a dar forma al terreno. Fuente: Shan, J. y K. Toth, 2009.

Otra ventaja, es el empleo de algoritmos de clasificación de los puntos y si se suma fotografías de alta resolución, (las cuales generalmente se encuentran integradas en los sistemas LiDAR de última generación), se puede realizar dichas asignaciones de clases con respecto a su cobertura. Como el follaje vegetal (Maltamo et al., 2014). Donde diferentes investigaciones proponen el empleo de dicha tecnología integrada con fotografías aéreas y satelitales para estudios de biomasa midiendo la altura de los diferentes arboles presentes en la muestra. Si a esto se le suma estudios multitemporales, cuya metodología consiste en hacer mediciones durante diferentes fechas del año o con cierta periodicidad, se pueden generar modelos de tendencia de crecimiento de la biomasa lo que contribuye a la toma de decisiones ambientales (P. Tickle et al., 2009; Chen et al., 2011; Gopalakrishnan et al., 2015). Igualmente, aprovechando los producto derivados de la nube de puntos se puede hacer aplicar algoritmos de filtraje de los elementos no deseados como autos, casas, líneas eléctricas y otros que no estén relacionados con la biomasa y por consiguiente crea modelos de superficie normalizados (nDSM) donde solo se observan los arboles con sus correspondientes alturas para finalmente emplear algoritmos basados en objetos para su respectiva individualización y conteo.

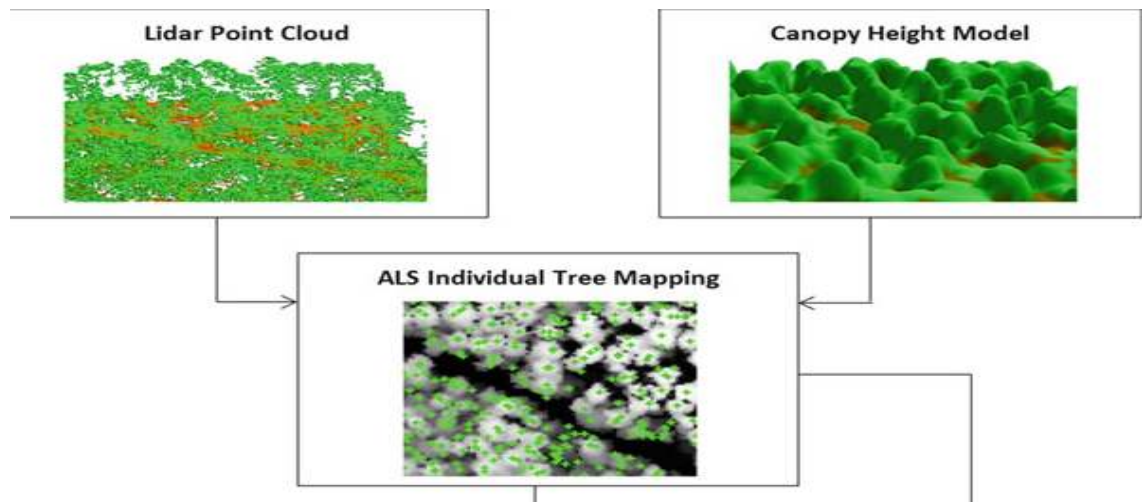


Figura 3. Aplicaciones forestales empleando tecnología LiDAR. Fuente: Maltamo et al., 2014.



Sin embargo, el empleo de la tecnología LiDAR no se limita a estudios terrestres, también se están desarrollando aplicaciones interesantes de tipo atmosférico como la investigación propuesta por (Gao et al., 2015). Donde se emplea sistemas LiDAR aerotransportado con la diferencia que la intensidad del haz de luz emitido se ubica sobre el ultravioleta (15nm-400nm) lo que es útil para usos de medición sobre aerosoles ubicados en la atmósfera, en este caso, la determinación de la altura de las diferentes capas atmosféricas posterior a la aplicación de diferentes correcciones como es el caso de la dispersión Rayleigh.

En el caso de Hidráulica e Hidrología los productos derivados como el DSM y DTM son útiles para modelación de inundaciones (Euillades et al., 2002). y/o de socavación empleando otros tipos de software sobre un área específica. Estos tipos de modelaciones son de carácter indispensable a la hora de medir el impacto de un cruce subfluvial de la tubería sobre un río. Sin embargo, en el momento de la toma de datos existe la limitante de pérdida de información con respecto a la lectura del láser sobre la lámina de agua de los ríos y/o cuerpos de agua. Esto se debe a las propiedades de absorción del agua sobre la intensidad de la señal ya que el haz de luz aerotransportado se ubica sobre el espectro del infrarrojo, por lo que se hace necesario crear modelos batimétricos obtenidos mediante otro tipo de sensores sobre la zona de estudio. Aquí entra el sensor tipo LiDAR batimétrico, cuya diferencia con respecto al LiDAR aéreo radica en que el haz de luz se ubica sobre la longitud de onda del verde (Zege et al., 2004). La ventaja de los dos modelos de nubes de puntos es que se pueden integrar y generar un modelo completo tanto de terreno como batimétrico, a esto se puede sumar otras imágenes de tipo hiperespectral, multiespectral y de radar así como información geoespacial adicional como capas de cobertura, usos de suelo y tipos de suelo para correr modelos hidrológicos e hidráulicos como escorrentía, inundación (Di Baldassare., 2013), socavación, velocidad de flujo, entre otros. Siendo una herramienta muy útil para estudios costeros y fluviales. (Carbonneau y Piegay., 2013).



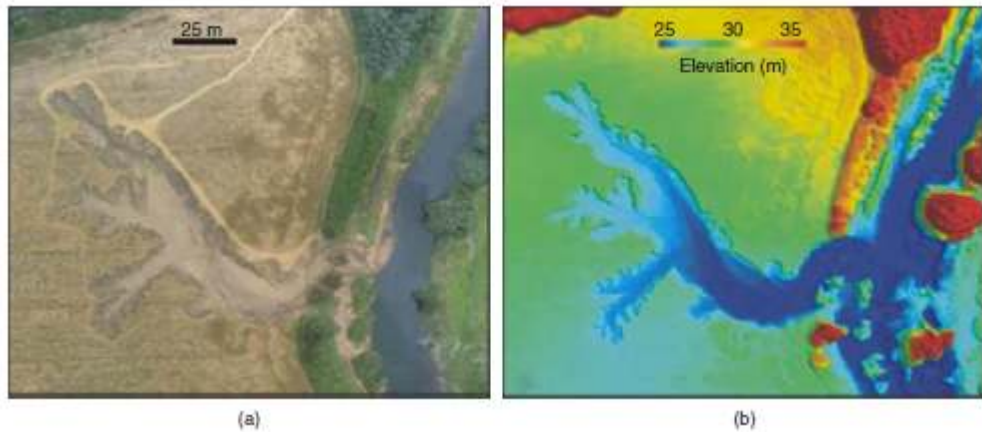


Figura 4. a) mosaico RGB de una zona con presencia de cuerpo de agua. b) DSM obtenido de un LiDAR. Fuente: Carbonneau y Piegay., 2013.

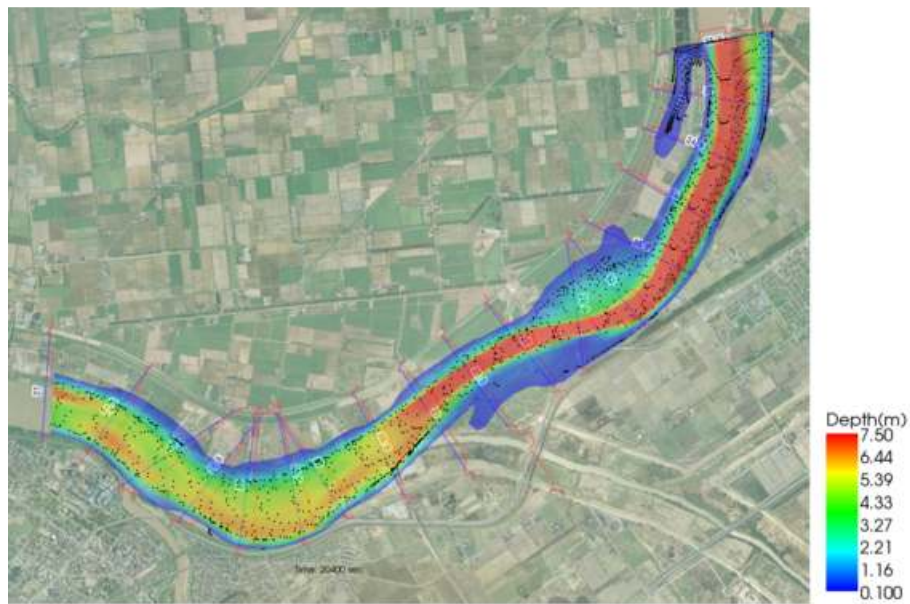


Figura 5. Modelación hidráulica de socavación sobre un río. Fuente: International River Interface Cooperative, Software, 2016.

Ahora bien, también es posible llevar una representación de la realidad a modelos 3D cuyas aplicaciones varían desde el ordenamiento territorial hasta a la generación de paisajes para videojuegos. Aunque se ha avanzado mucho en este campo, todavía se siguen generando algoritmos para modelar la respectiva nube de puntos de forma óptima y detección de ciertas formas geométricas basadas en objetos para

su clasificación, todo ello de forma automática ([Awrangjeb, 2015](#)). Cuya aplicación catastral es importante para estudios multitemporales, tomando como línea base la cartografía antigua e identificar aquellas construcciones no legalizadas.

En el ámbito geológico, El uso de sensores remotos con propiedades como la alta resolución espacial, son fuente muy fiable para identificar geoformas de cierta zona de estudio, esta ventaja puede potenciarse mediante la integración con DTM's. permitiendo realzar características como los pliegues y fallas geológicas ([Gonzales et al., 2004](#); [Fowler et al.; 2009](#); [Milenkovi'c et al., 2015](#)). Clasificación de las pendientes del terreno e inclinación, además se puede extraer la rugosidad del terreno ([L. Prost, 2013](#)). Adicionalmente esta información se puede integrar con otras imágenes de diferentes sensores. Una imagen tiene la limitación de observar sobre la superficie sin detallar lo que se esconde bajo los diferentes tipos de cobertura como la vegetación, pero al integrar esta imagen con los productos derivados LIDAR se amplía el horizonte de información del terreno. Un buen exponente de este concepto es el estudio realizado por [Anbazhagan et al., \(2011\)](#). En él se toca la integración de imágenes provenientes tanto de un sensor activo como de un pasivo para el estudio geomorfológico aplicado sobre el valle del río Elbe, Alemania. Primero se generó imagen un DSM proveniente del LiDAR y se adquirió una imagen IKONOS con 1 metro de resolución espacial. Se estudiaron las geoformas mediante observaciones sobre las imágenes de forma separada, obteniéndose ciertos resultados que en algunos casos variaban de una imagen a otra. Sin embargo, mediante software especializado se realizó una integración de las dos imágenes, dando como resultado un modelo 3D con datos en sus coordenadas X,Y,Z más las coberturas presentadas en la imagen IKONOS. Lo interesante del ejercicio es que facilito la identificación de ciertos rasgos características de algunas geoformas que andaban ocultas en la imagen satelital y las cuales fueron identificabas con el DSM, pero que no se contaba con la certeza para clasificarlas apropiadamente. Esta investigación es un referente en la importancia de estos sensores para reconocer las geoformas de la zona de interés

que puedan tener un impacto importante sobre el trazado de proyectos de infraestructura, a pesar de que en la literatura revisada no se encontró discusión de este tema en concreto.

Aprovechando el nivel de detalle del LiDAR, se ha desarrollado algunas aplicaciones en infraestructura de transporte ([Transportation Research Board, 2001](#)). Uno de los primeros proyectos a gran escala en su parte aplicativa, es el de la autopista expés de la costa Este en Malasia ([Ganendra y Ganendra, 2007](#)). Aunque el caso es aplicado a Vías y transporte, las componentes de estudio incluyendo las etapas de diseño del alineamiento son iguales a las del proyecto de un gasoducto.

El proyecto consistía en diseñar una autopista de 200 km de longitud la cual debe pasar sobre varios tipos de terreno, coberturas, tipos de topografía y otros obstáculos. La primera actividad es realizar la topografía. Sin embargo, existe zonas de tan difícil acceso y con tan complicadas condiciones climatológicas que hicieron reflexionar al equipo encargado de los enormes costes y sobre todo el tiempo que tomaría en finalizar los trabajos por medio de medios tradicionales, como las típicas comisiones topográficas por medio de herramientas como las estaciones totales.

Tomando en cuenta lo anterior, consideraron una tecnología emergente llamada LiDAR. El equipo analizó, primero que todo, las funcionalidades técnicas de la tecnología y la información que podían brindarles para luego proceder a su evaluación tiempo-costo y compararlo con los métodos tradicionales llevándose la sorpresa de finalizar las labores de levantamiento en solo 22 días más 89 días de entrega de los subproductos como DTM (*Digital Terrain Model*) y DSM (*Digital Surface Model*) a un costo de us\$1.3 millones versus los más de 250 días y US\$2.1 millones por medios tradicionales. Esta relación de costo-tiempo hizo que la balanza se inclinara a favor del LiDAR. Finalmente recibieron el producto con un detalle impresionante para su época y un área bastante amplia (200 x 1.5 km) y resolución de 2 puntos/m<sup>2</sup>) el procesamiento de la información obtenida la realizó el contratista

empleando software especializado que integra la nube de puntos, los datos GPS e IMU. El área entregada y detalle fue mucho mayor a la tradicional, donde se contemplaba secciones cada 100 metros y un ancho de 60 metros además del detalle limitado de obstáculos. Con el LiDAR, se obtuvo información adicional de la zona como infraestructura, viviendas y bosques. A pesar de ello, en el artículo se menciona que el mayor interés era el DTM y que desafortunadamente se subutilizó; un insumo donde hubiese podido extraer mucha más información importante. Haciendo uso del DTM se pudo realizar el diseño de la vía, esto fue gracias a la aplicación del software MOSS en el cual se pudo proceder con el diseño geométrico de la autopista y calcular los respectivos volúmenes con mayor detalle.

Aunque la precisión vertical oscilaba entre los 0.054 m y 0.396 m, (siendo menos confiable que los métodos tradicionales). El nivel de detalle del terreno que arrojó la tecnología LiDAR en las zonas de difícil acceso como selvas y alta densidad urbana, compensaba perfectamente la pérdida de precisión comparados con la topografía tradicional ([Ganendra y Ganendra., 2007](#)).

Pero las aplicaciones en el campo de infraestructura no solo se limitan al uso de sistemas LiDAR. Desde ya hace un tiempo reciente, se consigna la ventaja de los sensores remotos como un método eficiente y efectivo en relación a su costo-beneficio para el monitoreo de derechos de vía de gasoductos. De acuerdo al artículo de [Fung et al., \(1998\)](#). *Application of Remote Sensing Data for Monitoring of Gas Pipeline Right-of-Way. Canadá Center for Remote Sensing. 2010.*

Aunque tradicionalmente el monitoreo es de tipo presencial con personal que recorre el trazado de forma periódica y los cuales hacen mediciones con instrumentos como navegadores, cintas entre otros. Resulta bastante costoso debido a la exigencia de recursos humanos y en especial de tiempo porque un trazado de varios kilómetros puede demorar varios días en recorrerlo completamente. Sin embargo, cuenta con la gran ventaja de obtener información

fiable debido a su presencia insitu. Pero los cambios morfológicos debidos a la naturaleza como inundaciones, incendios, deslizamientos, etc. No da espera por lo que es necesario buscar un punto de equilibrio entre rapidez y fiabilidad de la información.

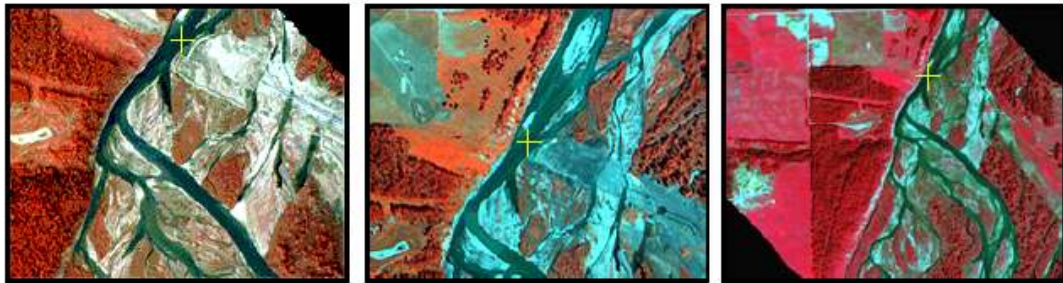


Figura 6. Dinámica morfológica de un río mediante el empleo de imágenes satelitales. Se puede observar la variación del cauce. Fuente: Fung, Fraser, y Gauthier, 1998.

Por lo tanto, el Centro de sensores Remotos de Canadá empleó imágenes de media y alta resolución espacial para el monitoreo de derechos de vía en grandes longitudes, permitiendo observar situaciones de riesgo de forma eficiente y monitorear situaciones de dinámica morfológica como cruces fluviales lo que ayuda a la toma de decisiones para desarrollar estudios de sistemas de protección o cambio de trazado (Fung et al., 1998).

Existe otra aplicación exitosa para infraestructura como la planeación y diseño de la variante Raleigh en Mississippi la cual se contempla construirse en una longitud de 8 kilómetros (Uddin, 2002). Uno de los objetivos es adquirir información precisa del terreno y georreferenciada para evaluar las diferente alternativas del trazado y que sirva de base para el diseño, siendo la tecnología LiDAR la única que cumplía con estos requisitos además de ser una tecnología no invasiva lo que disminuía los riesgos de trabajo y afectación ambiental en comparación con los métodos tradicionales. Se empleó el levantamiento con LiDAR sobre una plataforma aérea. El levantamiento increíblemente tomó solo dos horas, si se hubiera realizado de



forma convencional los tiempos de entrega serían mucho mayores. La información adquirida contempla una nube de puntos más las fotografías aéreas que son tomadas de forma simultánea con el LiDAR, además se generaron derivables a partir de la nube de puntos como DSM, DTM y curvas de nivel.

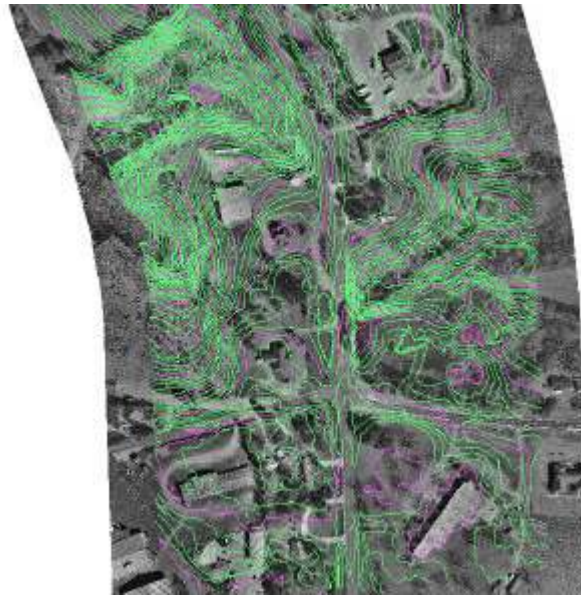


Figura 7. Curvas de nivel sobre ortofoto. Fuente: Uddin, 2002

Para la georreferenciación de los datos, se levantaron puntos de control alrededor de los 8 kilómetros con GPS de doble frecuencia RTK. Toda esta información fue integrada en un software especial de procesamiento para asegurar la calidad del producto. Uno de las preocupaciones es la precisión vertical, para ello se realizó levantamientos de forma tradicional con estación total para control y verificación. No obstante, encontraron que el ejemplo de la tecnología LiDAR arrojaba un margen de confianza del 95 por ciento de la precisión vertical siendo aceptable para los propósitos del proyecto y donde se alcanzó desfases en su mayor punto de 15 cm. Haciendo la salvedad de que esto se podía constatar en áreas urbanas y/o despejados porque en zonas boscosas altamente densas se podía apreciar que los márgenes de error eran mayores (Uddin, 2002).

Teniendo en cuenta de que existe afectaciones que arroja alta variación en la componente vertical, se ha realizado estudios donde se evalúa el empleo de la tecnología LIDAR y sus derivados para el diseño de infraestructura pero complementándola con las tecnologías tradicionales como son el empleo de Estación total, GPS de doble frecuencia y fotogrametría (Veneziano et al., 2002). En el documento se describe que el empleo de tecnologías tradicionales son útiles con respecto a su precisión altimétrica (GPS) además de una buena cantidad de información que se recolecta. Sin embargo, menciona que el método fotogramétrico es más conveniente para la etapa de exploración y prefactibilidad debido a que gracias a la fotografía aérea es posible analizar las coberturas terrestre y medir los impactos ambientales y sociales que pueden acarrear pero a la hora de obtener topografía del terreno, (empleando el uso de los GPS y estaciones totales) se pierden detalle. Esto se debe a la generación de superficies triangulares TIN derivados de los puntos de referencia altimétrica y planimétrica levantados a lo largo del corredor, su poca densidad hace que se omita una gran cantidad de detalle. Esto es importante, ya que la superficie TIN es el insumo principal para algunos diseñadores, haciendo que el trabajo pierda confiabilidad. Por lo tanto, como se afirmó anteriormente, la fotogrametría tradicional se empleó para evaluar los potenciales corredores y medir su factibilidad. Una vez seleccionado el corredor, el uso del LIDAR se perfila como una herramienta mucho más versátil para el levantamiento detallado de la zona de estudio, además de ser una tecnología no invasiva lo que presenta beneficios en la movilización de personal a campo ya que solo se limitaría a estar en la plataforma donde se encuentra el equipo y la georreferenciación de los puntos de control para el postprocesamiento. Pero es importante resaltar que en el empleo del LIDAR se debe contar con un experto en la interpretación de la información ya que existen una serie de errores que afectan la calidad de los datos como el ruido originado en la superficie del terreno y/o errores de equipo GPS/IMU por mala calibración. Como por ejemplo, lo que hicieron los investigadores Bethel et al., (2006). Cuya participación se enfocó en el proyecto de levantamiento aéreo de la carretera con nombre Marion County en Indiana E.U. en

los posibles errores que se pueden derivar del LiDAR, encontrando hallazgos como los errores de calibración del láser, GPS y el IMU donde concluyeron que debe existir una coordinación entre el pulso emitido y la lectura de los sensores de localización respectivamente, este procedimiento es obligatorio antes de cada vuelo, cuya mala calibración puede derivarse en errores de posición y de orientación. Errores de rango, el cual consiste en la dispersión de la onda del láser causado por condiciones atmosféricas, esto fenómeno se acentúa cuando el avión está a mayor altitud. Errores de retorno del pulso, esto se traduce en la pérdida de energía del pulso laser a medida que pasa por diferentes coberturas llamándose “retornos”. Sin embargo, algunos pulsos pierden su energía en el primer retorno sobre una vegetación o estructura. Haciendo que a la hora de filtrar la información pueda ser interpretada como “suelo” siendo este un error. Cómo uno de los objetivos del proyecto es medir el nivel de confiabilidad del LiDAR para la aplicación en la planeación y diseño de infraestructura. Se crearon unos polígonos de control sobre el corredor de interés y georreferenciados con GPS de doble frecuencia para posteriormente verificar la precisión horizontal y vertical de la nube de puntos. Para darle una mayor ajuste al proyecto se realizó el levantamiento con el LiDAR aéreo en dos vuelos con sentidos opuestos. Los resultados con respecto a su precisión horizontal arrojaron valores que varían de los 7 a 9 cm y en vertical de los 2 a los 30 cm, siendo este último mayor en las zonas con alta presencia de árboles y bosques, debido a la pérdida de energía del pulso para llegar al suelo y el ángulo de emisión. Dando indicios de ser menos confiable que un GPS. Aunque aún falta por mejorar la precisión vertical, la tecnología LiDAR está incursionando fuertemente en la industria del oil and gas cuya capacidad de brindar información a detalle se encamina como una solución a la necesidad de obtener mapas fiables que represente los riesgos de tipo geológico, geomorfológico, cambios de coberturas, entre otros para el monitoreo del trazado de un gasoducto. La oficina de seguridad de tuberías adscrita al departamento de transporte de los E.U. se ha interesado en esta tecnología junto con los sistemas de información geográfica para generar, en un futuro, los mapas de riesgo de los 1.9 millones de kilómetros de



tubería existente en Norteamérica además de servir de insumo para la evaluación de futuros trazados. Es tal la fiabilidad en la información, que los derivados como el DTM son usados para evaluar diferentes parámetros como las pendientes del terreno, aspecto de la dirección del terreno, curvatura que mide la forma de terrenos cóncavos y convexos. Además, Los datos originales del LIDAR y los parámetros del derivado DTM sirven para realizar varios análisis importantes como son las curvas de nivel cuya representación de polilíneas define la topografía a la que se enfrenta el trazado, el volumen el cual puede ser calculado a la hora de excavaciones en terreno acompañado de una sección transversal, drenajes presentes en el terreno que junto con las pendientes pueden servir para estudios de deslizamiento y estimación de biomasa para potenciales zonas de incendio (Tao y Hu., 2002). Un proyecto destacado es el gasoducto de Alaska apoyado por la coordinación federal de transporte de gas natural de Alaska de los E.U. donde el objeto es crear un mapa de gran precisión para alimentar el sistema GIS de la misma oficina que sirva insumo para estudios de futuros líneas de gasoductos.

Una propuesta interesante para la etapa de selección de rutas de infraestructura, tiene que ver con el análisis de erosión usando información de imágenes de media resolución espacial y uso de información de dominio público para la selección de ruta de un gasoducto en Azerbaijan (Winning y Hann., 2014). Como es bien sabido, la erosión es un factor importante en el desarrollo de un trazado, tanto en su construcción como en su mantenimiento. Los diferentes tipos erosivos del suelo pueden generar riesgos importantes en el comportamiento mecánico de la tubería hasta llegar al punto de rotura, un ejemplo es la socavación en la base por escorrentía la cual está relacionada al tipo de suelo, pendiente, precipitación y cobertura.

En esta metodología se propone el uso de imágenes de media resolución espacial, la cual se puede encontrar de forma gratuita y se aplica la ecuación de pérdida general del suelo o USLE (para sus siglas en inglés). En ella se toman en cuenta

variables como la precipitación, factor de erosión, pendiente, factor de manejo de la cobertura cultivable y factor de control de erosión. El grado de severidad de la erosión varía desde 1 hasta -3 siendo el primero más estable y el último como altamente erosionable o inestable.

Estas variables se calculan adaptando las diferentes ecuaciones provenientes de entidades de dominio público como la Organización meteorológica mundial, la División de Estadísticas de las Naciones Unidas, Departamento de Economía y Asuntos Sociales, entre otros. Aunque los resultados fueron satisfactorios para la etapa de estudio y el nivel de resolución manejado, el autor recomienda gestionar imágenes de mayor resolución espacial además de verificar en campo las respectivas zonas calculadas.

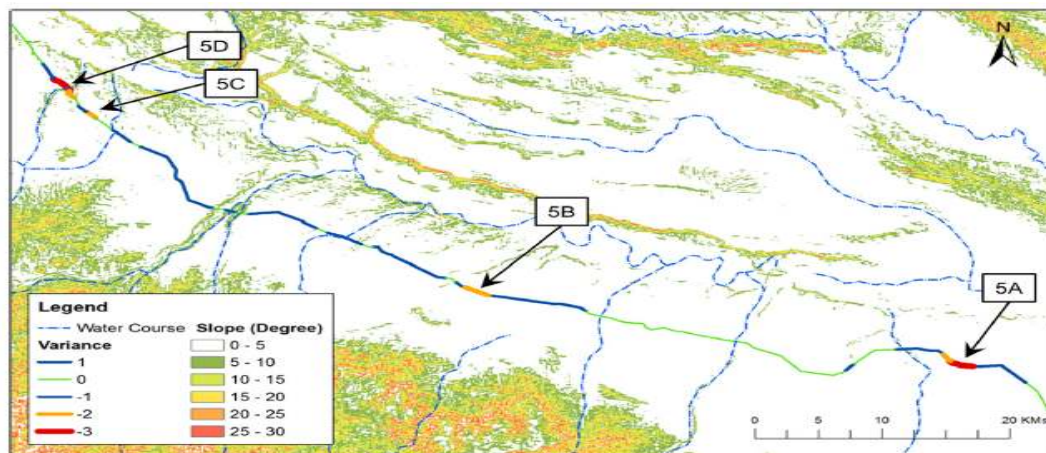


Figura 8. Mapa final de erosión para un trazado de gasoducto, se puede observar los tramos más susceptibles a erosión. Fuente: Winning y Hann, 2014.

Una aplicación de los sensores remotos ha sido en la planeación de nuevas redes de transporte sobre un área específica ya densamente urbanizada.

Un problema de los países desarrollados, específicamente en Norteamérica, es el crecimiento acelerado de algunas ciudades, donde la presión demográfica desencadena en urbanización del terreno de forma continua y agresiva, trayendo

como consecuencia perdida del suelo rural con potencial productivo, incremento en los niveles de polución, perdida de cuerpos de agua y zonas forestales importantes, afectando el equilibrio de un desarrollo sostenible.

El uso de imágenes de tipo hiperespectral y multiespectral ayuda a la identificación de diferentes coberturas mediante métodos de procesamiento, las cuales fueron digitalizadas lo que permite cuantificar su área de forma aproximada; además de ser un insumo importante para evaluar impactos ambientales, en este caso, para la planeación de nuevas rutas de la red de ferrocarriles sobre el golfo de Mississippi (Repaka et al., 2003).



Figura 9. Mapa de coberturas sobre el golfo de Mississippi. Fuente: Repaka et al., 2003.

El desarrollo del proyecto se realizó en varias fases. La primera fue adquirir imágenes de mediana resolución que permitiera abarcar una gran área sobre la zona de interés, posteriormente se realizó un análisis espacial de acuerdo a los intereses del proyecto con el fin de minimizar la zona a estudiar, a continuación, se aplicaron metodologías de procesamiento, clasificación y digitalización de las áreas seleccionadas para su cuantificación, la siguiente fue gestionar la adquisición de imágenes de mayor resolución para refinar la búsqueda del corredor seleccionado

y obtener mayores beneficios en cuanto a su información. Finalmente toda la información procesada es guardada como insumo para futuros estudios.

En el campo de la planeación para nuevos trazados, se puede asegurar que el uso del LiDAR y demás sensores remotos brinda suficiente información altimétrica del cual es posible generar planos planta-perfil para analizar la zona observada, así como su topografía, geomorfología y planos de obstáculos con su respectivo abscisado. Entregando suficientes elementos de juicio para seleccionar la ruta cuya relación seguridad-costo-beneficio sea la más rentable, así como identificar información para estudios de inundabilidad de la zona por medio de información hidrológica ([Clintock., 2008](#)).

## 5. MARCO TEORICO

El marco teórico de la presente investigación se fundamenta en el conjunto de conceptos, definiciones e hipótesis seleccionados para relacionarlos con los datos provenientes de diversos sensores que mejor se adapte a un procedimiento de análisis del territorio empleando los sensores LiDAR, imágenes aéreas y satelitales enfocado en la evaluación de infraestructura en trazados de gasoducto

### 5.1. PROCESAMIENTO LIDAR

El punto de partida de la presente investigación radica en el procesamiento de los insumos primarios, específicamente la nube de puntos LiDAR.

Antes del procesamiento de la nube de puntos LiDAR, es necesario conocer la codificación del formato el cual será transportado y manipulado. Hoy en día, existen varios tipos de formatos como el ASCII o XML. Sin embargo, estos formatos tienen las características de limitar información de atributos codificada (metadato), además de la representación gráfica de la información a la hora de cargarlos en un ordenador. Por lo tanto, Es importante conservar la mayor cantidad de información del metadato de cada punto, de estos metadatos se destaca los atributos como: coordenada X, Coordenada Y, Coordenada Z, intensidad, tiempo lectura GPS, número de retornos, el tipo de retorno, identificador de punto, clasificador. Además de procurar en conservar esta información, también es necesario tener un formato lo suficientemente flexible y con capacidad de transporte y lectura para las configuraciones de hardware y software existentes en todo tipo de ordenador. A partir de este criterio se creó el formato .LAS el cual puede ser manipulado en su etapa de pre-procesamiento y en el cual se realizan ajustes de empalme de líneas de vuelo, alturas de referencia, mosaico de puntos, etc. (lo cual no es objeto de este estudio) y su postprocesamiento para extracción de atributos del terreno ([Graham, 2009](#); [Shan y K. Toth, 2009](#); [Petrie y Toth, 2009](#); [Heritage y Large, 2009](#)).

Ahora bien, los archivos .LAS deben someterse a un proceso de filtraje con el propósito de eliminar datos no deseados que están ubicados muy por encima del terreno y son conocidos como picos de ruido, los cuales son generados por la presencia de aerosoles en la atmosfera, o por interferencia de seres vivos como pájaros y/o nubes de insectos lo cual no tiene nada que ver con el sitio de interés (Hooper y Frick, 2010). La depuración puede ser empleada por algoritmos; uno de ellos es la definición de rangos de altura (Whitman et al., 2003). En este algoritmo se elimina toda la información que no se encuentre en un rango específico. Sin embargo, nunca se debe descartar la verificación, ajuste y depuración manual en las zonas que el filtro no haya sido efectivo. Así mismo, existen una buena diversidad de algoritmos de filtros y clasificación que pueden ayudar a identificar los puntos correspondientes al terreno de los demás, estos en su mayoría, toman como base el cambio topográfico basado en la continuidad de los puntos con respecto a su altura donde se distingue los cambios bruscos de los puntos sobre los edificios y la vegetación, también puede tomar la pendiente entre vecinos, intensidad del retorno o un rango de altura (Yang y Li, 2013). Existe un aplicativo de forma gratuita desarrollado por Zhang y Cui, (2007). El cual puede ser descargado de la dirección <http://LiDAR.ihrf.fiu.edu/LiDARtool.html> En sitio web se exploran diferentes algoritmos de filtraje, su desarrollo y su respectiva recomendación de acuerdo a las condiciones de terreno. Se destaca el ETEW (*Elevation Threshold with Expand Window*), el cual arroja buenos resultados para zonas de pendiente baja sin mucha variación y donde la presencia de objetos no relacionados sea baja. MLS (*Maximun Local Slope*), efectivo para remover vegetación en áreas montañosas con muy poca presencia de construcciones. *Progressive Morphology* (PM), útil para zonas planas y con gran cantidad de edificios. ILPF (*Iterative Local Polynomial Fitting*), es un algoritmo que trabaja bien en zonas montañosas en general pero tiende a presentar fallas en zonas demasiado empinadas y ATIN (*Adaptative Triangulated Irregular Network*) el cual es muy eficiente tanto para zonas bajas como altas pero requiere

un gran recurso computacional. Del buen filtrado depende la obtención de un buen DTM.

El DTM y DSM es la función continua que representa el terreno planimétrico 2D a elevación z del mismo (El-Sheimy et al., 2005). Cuyo insumo primario en este caso, es la nube de puntos. La estructura del dato generalmente es un raster representado por una grilla continua donde los datos de altura son almacenados como puntos regularmente alineados e interpolados, normalmente se aplica método de interpolación bi-lineal ya que arroja mejores resultados (Pfeifer y Mandlbürger, 2009). Además de generar superficies TIN (Triangular Irregular Network). Cuya representación es la superficie como una cantidad continua no traslapada de triángulos unidos sobre sus lados con irregular tamaño y forma, permitiendo modelar en buen detalle la superficie creando texturas (Felgueiras y Goodchild, 1995; Heritage y Large, 2009). Permitiendo una visualización del terreno en 3D con sus líneas de quiebre principales y secundarias. Además de permitir la generación de las curvas de Nivel.

### **La extracción de características del LiDAR**

Una de las formas para la clasificación de edificaciones dentro de las nubes de puntos es el empleo de algoritmos que identifiquen ciertos patrones en la distribución, posición, detección de bordes y ángulo de los puntos entre sus vecinos más cercanos, estos patrones están regidos por uno o más condiciones, además de uno o más algoritmos que clasifican de acuerdo a zonas de entrenamiento de zonas y rasgos característicos (Jie y Aparajithan, 2009). Actualmente existen varios métodos para la clasificación de edificaciones, vegetación, suelo entre otros. Se parte del principio que para el buen funcionamiento del algoritmo se debe obtener una buena calidad en la filtración de ruido de los archivos .LAS para evitar clasificaciones erróneas y detección de bordes mediante técnicas de parámetros morfológicos como de Canny o Laplaciano. Estos son filtro de paso alto para facilitar

la detección de bordes y que según [Chuvieco, \(1996\)](#) “evitar la eliminación de bordes importantes y no suministrar falsos bordes, estableciendo que la distancia entre la posición real y la localizada del borde se debe minimizar y que integre las respuestas múltiples correspondientes a un único borde. Se resume en el cálculo de la magnitud y orientación del vector gradiente en cada pixel para reducir el ancho de los bordes adquiridos, hasta de un pixel para finalmente aplicar una función de histéresis basada en dos umbrales para reducir la posibilidad de contornos falsos”. No obstante, también es posible el empleo de la imagen aérea para una mejor clasificación de coberturas; aunque los datos vectoriales inherentes de la nube de puntos da una representación de la distribución espacial del objeto observado, no brinda información acerca del comportamiento espectral del mismo objeto, algo que si facilita la fotografía aérea y/o satelital, además de una mejor definición en el contorno de la figura. Por lo tanto, teniendo en cuenta estas características, se puede aprovechar tanto los datos LiDAR como las fotografías para una mejor extracción. [Franz y Simón, \(2009\)](#) mencionan la posibilidad de obtener un DSM de alturas relativas de los objetos o “DSM normalizado” siendo este un subproducto de la resta del DTM con el DSM, (ambos provenientes de la nube de puntos LiDAR), siendo este un insumo para la aplicación de filtrajes de paso alto o paso bajo ya sea para realzar las características de los bordes de la imagen o reducirlas. En este punto, cobra relevancia la aplicación de la técnica de clasificación por objetos. Y Cuyo protagonismo se dirige al uso complementario de las imágenes aéreas y/o satelitales dependiendo de la cantidad de bandas que ofrece el producto raster, se puede generar índices de reflectividad como el NDVI (índice de vegetación de diferencia normalizada) o GLI (*Green Leaf Index*), muy útiles para distinguir la reflectancia entre un edificio y una vegetación lo que complementa y mejora la clasificación de ciertas estructuras, en comparación con el sólo uso de los derivados del LiDAR.



## 5.2. PROCESAMIENTO IMÁGENES AEREAS Y SATELITALES

El principal insumo de la investigación es la imagen aérea cuyas características son: resolución espacial de 10cm, resolución radiométrica 8 bits, resolución espectral de tres bandas RGB (espectro visible). Igualmente se emplearan imágenes de otros sensores de acceso gratuito como la Landsat 8. De tipo multiespectral, lo que brindaría información adicional de suma importancia para modelación hidrológica e hidráulica y en la toma de decisiones a la hora de diseñar la infraestructura.

Para la imagen aérea se tiene la limitante de contar solo con tres bandas: verde (G) con 400-500 nm, azul (B) con 500-600 nm y rojo (R) con 600-700 nm, las cuales se encuentran dentro del espectro visible, teniendo en cuenta las condiciones de la imagen, es apropiado hacer empleo del índice GLI (*Green Leaf Index*) ([Gobron et al., 2000](#)). Este índice permite realzar la reflectancia de la vegetación aprovechando las bandas anteriormente mencionadas. Por lo tanto, se puede hacer ciertas distinciones de los elementos antrópicos de zonas forestales y/o vegetación. Y sus respectivas clasificaciones ayudadas por el uso de la nube puntos LiDAR ([Richards, 2013](#)).

Hoy en día, la clasificación basada en píxeles es la técnica más ampliamente utilizada además de ser la más tradicional. El procedimiento analiza la respuesta de las propiedades espectrales de cada píxel dentro del área, sin tener en cuenta la información espacial y contextual relacionada al píxel de interés. Para imágenes de baja y mediana resolución (Landsat 8, Sentinel 2, entre otros) la clasificación funciona de forma muy aceptable pero a medida que la imagen aumenta de resolución espacial (imagen aérea) se evidencia una mayor heterogeneidad en los píxeles sobre la zona, arrojando como resultado un efecto de mezcla de clases, es decir, errores en la clasificación sobre la imagen. En este caso, la clasificación basada en objetos, analiza las propiedades espectrales y las propiedades

espaciales/contextuales de los píxeles mediante un proceso de segmentación y algoritmos por procesos iterativos que permite una clasificación más precisa que la tradicional ([Elberink y Vosselman, 2005](#); [Weih y Riggan, 2013](#); [Richards, 2013](#)). Este método puede aplicarse a todo tipo de imágenes.

De la imagen Landsat-8 se extraerá el índice NDVI (índice de vegetación de diferencia normalizada) para efectos de clasificación y de la imagen aérea el índice GLI (*Green Leaf Index*). Sin embargo, es necesario aplicar primero medidas de corrección de los valores de píxel ya que cuando se realiza la descarga de los archivos estos presentan distorsiones por lo que es imperativo calibrar la imagen y hacer la respectiva corrección atmosférica, pasando los valores de radiancia a reflectancia. Igualmente, en caso de ser necesario, dependiendo del nivel de procesamiento de las imágenes adquiridas, se emplean las correcciones de distorsión geométrica ([A. Schowengerdt, 2007](#); [Richards, 2013](#)). El tipo de corrección radiométrica no se hizo en la imagen aérea debido a la baja altitud de vuelo, ubicándose por debajo de las nubes y aerosoles que incrementan la distorsión. Además ya está corregida geométricamente de acuerdo a lo suministrado por Promigas S.A E.S.P.

Ahora bien, las imágenes deben ser sometidas a un balance en el contraste para realzar ciertas características por lo que es necesario aplicar técnicas; algunas de las más comunes son la de tipo lineal, logarítmico y exponencial o la ecualización del histograma la cual transforma la imagen de entrada a una imagen de salida con un histograma de los píxeles uniformemente distribuido (ecualizado). Igualmente en caso de ser necesario, aplicar técnicas de filtraje ya sea para suavizar o realzar algunas características como fillos o líneas. El filtro de paso bajo es diseñado para remover información de alta frecuencia como ruido presente en la imagen, arrojando como resultado una imagen suavizada pero a expensa de reducir el detalle de la misma. El filtro de paso alto permite hallar fillos de bordes y líneas las cuales son informaciones de alta frecuencia en la imagen, por lo tanto, el principio radica en

remover bajas frecuencias de la misma. También existen varios tipos de filtros como el Laplaciano, gradiente entre otros (A. Schowengerdt, 2007; Jian y Philippa, 2010; Weng, 2010; Richards, 2013).

Para la clasificación de la imagen Landsat-8 y la imagen aérea se emplearán algoritmos de clasificación Basada en objetos mediante el uso de software comercial. Empleando métodos apropiados teniendo en cuenta parámetros morfológicos y nivel de reflectividad de la imagen (Konecny, 2014).

### **5.3. GEOLOGIA Y GEOMORFOLOGIA**

Para la fotointerpretación de las características externas físicas de las formaciones geológicas, los insumos como el LiDAR, DSM, DTM y fotografías aéreas o satelitales, juegan un papel importante partiendo del hecho de que “toda formación geológica se reflejan necesariamente en la topografía dando pistas acerca de los diferentes procesos geomorfológicos que ha soportado el terreno a lo largo de millones de años, siendo un agente fundamental dentro de estos procesos, el clima. Para una adecuada fotointerpretación se debe tener en cuenta las características del relieve, forma de la superficie y pendientes” según Vengoechea, (1966).

Para ilustrar ligeramente los temas de los cuales trata la geología física, “hay que tener claro los principales fenómenos a los que están sometidos las rocas y los suelos los cuales describen el ciclo de las rocas: El magma da origen a las rocas ígneas y éstas (u otras) dan origen a los sedimentos; por su parte los sedimentos consolidados dan origen a las rocas sedimentarias. Pero las rocas sedimentarias (y las ígneas) dan origen a las rocas metamórficas y éstas a su vez pueden fundirse para producir magma” Duque Escobar, (1999).

Estas características de los tipos de rocas son reflejadas en mapas con fines de aportar información valiosa para la planificación de proyectos y ser útiles en la construcción y mantenimiento de obras de ingeniería. Aunque es posible encontrar información secundaria en las entidades oficiales del estado, estas están limitadas, pero no menos importante, a las propiedades de los materiales de los suelos. Por lo tanto, es importante adquirir de forma adicional información que refleje los aspectos generales de interés para la ingeniería, como la descripción y clasificación geotécnica de suelos y rocas, propiedades físicas y mecánicas de los materiales, principales drenajes, condiciones y procesos geomorfológicos, dependiendo del tipo de objetivos que se fijan en el proyecto. En el estudio, el análisis geoformas está ligado a la planificación de infraestructura con alcance local con escala 1:5.000, en él se incluye el análisis de datos topográficos y geomorfológicos (Gonzales et al., 2004). Para la clasificación geomorfológica, se usará como insumo el DTM, previamente obtenido de la nube de puntos LiDAR después de aplicar una adecuada filtración de las coberturas superficiales como vegetación, viviendas, líneas eléctricas y todo aquello que no tenga ninguna relación con el suelo. Se plantea la aplicación del método RRIM (*Red Relief Image Map*) planteado por Chiba (Chen et al., 2015). El cual consiste en la medición angular obtenida de la relación entre la superficie del relieve y su distancia horizontal más conocida. La técnica extrae información del relieve en dos capas que describen la concavidad y convexidad (positivo y negativo), posteriormente se ejecuta la multiplicación de estas capas más la diferencia multiplicada por 0.5. Como resultado se obtiene una imagen del terreno que realza los rasgos sin las molestas sombras del hillshade que ocultan información.

El propósito del uso de este método es hacer una mejor distinción y fotointerpretación de los rasgos dentro de la zona como abanicos aluviales, mesetas, terrazas, lomas bajas, fallas geológicas locales, etc. Igualmente se usaran las imágenes de alta resolución aéreas e imágenes de mediana resolución como las landsat-8, y usar la superposición sobre el modelo DTM para una mejor

interpretación; así como facilitar la delineación de las estructuras, igualmente se espera que el uso de estas imágenes se pueda obtener información geomorfológica relevante ([Anbazhagan et al., 2011](#)).

[Gonzales et al., \(2004\)](#) afirma “ la delimitación y cartografía de unidades de roca o suelos en cuanto a sus propiedades físicas y mecánicas, como la resistencia, deformabilidad, permeabilidad, durabilidad, etc., se realiza en base a las propiedades geológicas de mayor relación con las propiedades geotécnicas. La composición mineralógica y la litología están directamente relacionadas con la densidad y plasticidad de los suelos. En las rocas la composición determina la dureza, resistencia, alterabilidad, etc., la textura y estructura mineralógica son también aspectos que proporcionan información sobre el comportamiento mecánico de los materiales en relación con la porosidad y densidad.

Las condiciones hidrogeológicas aportan información sobre las condiciones de alteración de suelos y rocas. En el caso de macizos rocosos, la frecuencia, la distribución y tipo de discontinuidades, el grado de fracturación y el grado de alteración o meteorización proporcionan información sobre la resistencia, deformabilidad y permeabilidad”.

Al modelo digital terreno se pretende calcular características asociadas a la topografía como el SPI (índice de fuerza de escorrentía) y CTI (índice topográfico compuesto) ([Universidad de Minnesota, 2015](#)). Estos índices permiten calcular las zonas más susceptibles a la erosión y la inundación respectivamente en función de su pendiente y orientación.

#### 5.4. HIDROLOGIA Y MODELACION HIDRAULICA

Gracias al avance tecnológico del sensoramiento remoto, las ciencias terrestres tienen la oportunidad de contar con un insumo de imágenes de alta definición para el estudio del entorno del área de interés y su posterior aplicación de modelaciones matemáticas para evaluar escenarios potenciales. Un ejemplo claro de esto es la aplicación de las ciencias de la hidrología e ingeniería hidráulica ([Monsalve, 1995](#)). Específicamente para fines de ingeniería, el principal objetivo es la modelación de fenómeno de socavación y máxima cota de inundación de los cauces más representativos dentro de la zona de estudio.

Para una correcta modelación, se deben considerar varios parámetros, como la caracterización de la hoya o cuenca hidrográfica, la cual define el área aferente sobre la que va a escurrir el agua en caso de lluvia. En este caso, se puede hacer el uso de modelos de elevación de terreno DTM por medio de interferometría de imágenes de media resolución y/o de nube de puntos LiDAR con la ventaja de que puede proporcionar grandes áreas lo que ayuda en una mejor definición de las principales cuencas y subcuencas hidrográficas sobre el sitio de interés ([J. Schmugge et al., 2002](#)). La definición de las áreas se realiza por métodos asistidos por computador conocidos como Sistemas de Información Geográfica (SIG). Así mismo, es necesario contar con datos de precipitación media diaria de las principales estaciones pluviométricas ubicadas cerca del área de estudio, su posterior cálculo estadístico y geoestadístico para generación de mapas de isoyetas o polígonos de Thiessen los cuales son líneas que unen los puntos en un plano cartográfico que presentan la misma precipitación en la unidad de tiempo con el propósito de determinar la precipitación media de una zona dada. Otros de los parámetros importantes para un buen estudio hidrológico, es contar con mapas de las principales coberturas sobre la cuenca hidrográfica, esta información puede ser extraída de imágenes ópticas de mediana resolución como las Landsat 8 y/o

Sentinel-2 por medio de métodos de transformación e índices que permita identificar coberturas vegetales más fácil como por ejemplo el Índice de Vegetación Normalizada NDVI y su posterior clasificación. Aprovechando las mismas imágenes ópticas, por sus características de tipo multiespectral, se tiene la ventaja de contar con bandas dentro del infrarrojo medio de mediana resolución espacial, esta banda tiene la capacidad de captar información de emisividad de la radiación de la fuente de energía sobre la superficie terrestre permitiendo generar mapas de temperatura, los cuales son indispensables para el cálculo de la evapotranspiración de la cuenca. Sin embargo, este alcance esta fuera del estudio ([Lavender y Lavender, 2016](#)).

Adicionalmente, se plantea el aprovechamiento de la información LiDAR para la obtención de la topografía del punto de interés sobre el que se va hacer la modelación hidráulica, esto radica en hacer un filtrado de las diferentes coberturas de la nube de puntos y extraer el DTM. Por lo que se obtiene una representación en 3D de la topografía de la zona y con un alto grado de confiabilidad.

Una vez procesado y obtenido los diferentes parámetros, se plantea realizar la modelación hidrológica para la máxima precipitación en un periodo de retorno de 100 años, además de realizar la modelación hidráulica, con el propósito de delimitar su área de inundación y su comportamiento dinámico en lo que respecta a su socavación, para el desarrollo de esta modelación se emplearía el software de uso gratuito "IRIC" perteneciente a la [International River Interface Cooperative, \(2016\)](#).

Finalmente se genera modelos 3d tomando como insumo los derivados del LiDAR y hacer la representación tridimensional del terreno objeto de estudio con el propósito de visualizar las condiciones del área a los interesados.

## **6. MARCO LEGAL**

En el presente capítulo se pretende proporcionar y describir de forma ligera, las bases legales que aplican sobre el alcance la investigación.

### **6.1. AMBIENTAL**

Los estudios ambientales de la Agencia Nacional de Licencias Ambientales ANLA, se refieren a Diagnóstico Ambiental de Alternativas y el Estudio de Impacto Ambiental.

Los estudios ambientales son objeto de emisión de conceptos técnicos, por parte de las autoridades ambientales competentes, estos se elaborarán con base en los términos de referencia que sean expedidos por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.

La autoridad ambiental competente podrá adaptarlos a las particularidades del proyecto, obra o actividad.

Los términos de referencia son los lineamientos generales que la autoridad ambiental señala para la elaboración y ejecución de los estudios ambientales que deben ser presentados ante la autoridad ambiental competente.

El solicitante de la licencia ambiental deberá utilizar los términos de referencia, de acuerdo con las condiciones específicas del proyecto, obra o actividad que pretende desarrollar.



El Diagnóstico Ambiental de Alternativas tiene como objeto suministrar la información para evaluar y comparar las diferentes opciones que presente el peticionario, bajo las cuales sea posible desarrollar un proyecto, obra o actividad. Las diferentes opciones deberán tener en cuenta el entorno geográfico y sus características ambientales y sociales, análisis comparativo de los efectos y riesgos inherentes a la obra o actividad, y de las posibles soluciones y medidas de control y mitigación para cada una de las alternativas.

El estudio de impacto ambiental es el instrumento básico para la toma de decisiones sobre los proyectos, obras o actividades que requieren licencia ambiental y se exigirá en todos los casos en que se requiera licencia ambiental de acuerdo con la ley. Este estudio deberá corresponder en su contenido y profundidad a las características y entorno del proyecto, obra o actividad, e incluir lo siguiente:

1. Objeto y alcance del estudio.
2. Un resumen ejecutivo de su contenido.
3. La delimitación del área de influencia directa e indirecta del proyecto, obra o actividad.
4. La descripción del proyecto, obra o actividad, la cual incluirá: localización, etapas, dimensiones, costos estimados, cronograma de ejecución, procesos, identificación y estimación básica de los insumos, productos, residuos, emisiones, vertimientos y riesgos inherentes a la tecnología a utilizar, sus fuentes y sistemas de control.
5. La información sobre la compatibilidad del proyecto con los usos del suelo establecidos en el POT (Plan de Ordenamiento Territorial).

6. La información sobre los recursos naturales renovables que se pretenden usar, aprovechar o afectar para el desarrollo del proyecto, obra o actividad.

7. Identificación de las comunidades y de los mecanismos utilizados para informarles sobre el proyecto, obra o actividad.

8. La descripción, caracterización y análisis del medio biótico, abiótico, socioeconómico en el cual se pretende desarrollar el proyecto, obra o actividad.

9. La identificación y evaluación de los impactos ambientales que puedan ocasionar el proyecto, obra o actividad, indicando cuáles pueden prevenirse, mitigarse, corregirse o compensarse.

10. La propuesta de Plan de Manejo Ambiental del proyecto, obra o actividad que deberá contener lo siguiente:

a) Las medidas de prevención, mitigación, corrección y compensación de los impactos ambientales negativos que pueda ocasionar el proyecto, obra o actividad en el medio ambiente y/o a las comunidades durante las fases de construcción, operación, mantenimiento, desmantelamiento, abandono y/o terminación del proyecto obra o actividad;

b) El programa de monitoreo del proyecto, obra o actividad con el fin de verificar el cumplimiento de los compromisos y obligaciones ambientales durante la implementación del Plan de Manejo Ambiental, y verificar el cumplimiento de los estándares de calidad ambiental establecidos en las normas vigentes. Asimismo, evaluar mediante indicadores el desempeño ambiental previsto del proyecto, obra o actividad, la eficiencia y eficacia de las medidas de manejo ambiental adoptadas y la pertinencia de las medidas correctivas necesarias y aplicables a cada caso en particular;

c) El plan de contingencia el cual contendrá las medidas de prevención y atención de las emergencias que se puedan ocasionar durante la vida del proyecto, obra o actividad;

d) Los costos proyectados del Plan de Manejo en relación con el costo total del proyecto obra o actividad y cronograma de ejecución del Plan de Manejo.

## **6.2. CARTOGRAFIA**

A continuación se menciona las principales normas para la correcta generación cartográfica en Colombia:

INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI (Subdirección de Cartografía y Geografía). Parámetros Y Consideraciones Generales para la Restitución de Cartografía Básica a Escala 1:10.000. Versión No. 1. 2007.

INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI (Subdirección de Cartografía y Geografía). Producción de datos geoespaciales para cartografía digital: Especificaciones técnicas. Versión No. 2. 2003.

NORMA TÉCNICA COLOMBIANA. NTC 5613. Referencias Bibliográficas. Contenido, Forma y Estructura. 2008

NORMA TÉCNICA COLOMBIANA. NTC 5205. Precisión de datos Espaciales. 2003

## 7. METODOLOGIA

En la actualidad, el empleo del sensoramiento remoto tipo LiDAR y ortofotos en proyectos de infraestructura de gasoductos aún no es ampliamente utilizado. De acuerdo con la justificación, tradicionalmente se han aplicado métodos convencionales de topografía en anchos de franja muy estrechos, generalmente menores de 100 metros, por lo que se obtiene una información limitada del terreno. En vista de esta situación, se optó por el uso de sensores remotos porque ofrecen una mayor cobertura del terreno (en este caso un ancho de 600 metros). Siendo los insumos principales la nube de puntos y la ortofotografía. Aun así, es necesario extraer la mayor cantidad de datos del terreno a partir de estos datos. Por lo tanto, se plantea por parte del autor, el uso de diferentes métodos de procesamiento de imágenes para la extracción de información y comparar sus resultados con una topografía tradicional con propósitos de análisis del territorio direccionado a proyectos de infraestructura.

En el presente capítulo de Metodología, el contenido se encuentra dividido en tres partes. El primero, corresponde al subcapítulo 7.1, donde se menciona el lugar y tiempo de estudio. El subcapítulo 7.2 describe, a manera informativa, el preprocesamiento al que fue sometido los datos después del vuelo para generar los insumos principales correspondiente a los datos vectoriales LiDAR y mosaico de la ortofotografía. La tercera parte, subcapítulo 7.3, es donde se centra la investigación y consiste en la aplicación de diferentes metodologías de procesamiento sobre los insumos sugeridas por el autor, con propósitos de extracción de información y análisis del territorio, en cumplimiento de los objetivos con sus respectivos resultados y conclusiones, en comparación con un levantamiento topográfico convencional.

## 7.1. LUGAR Y TIEMPO DEL ESTUDIO

El lugar de interés para el estudio, inicia aproximadamente en el casco urbano del municipio de Ciénaga con coordenadas 11°00'32"N; 74°12'47"W que pertenece al departamento del Magdalena, localizado a orillas del mar Caribe en el extremo nororiental de la Ciénaga Grande de Santa Marta, con una altitud de 3 msnm y temperatura promedio de 34 °C. La distancia a la ciudad de Santa Marta es de 35 km. y finaliza en una zona cercana al pueblo de Tucurínca con coordenadas 10°40'00"N; 74°07'05"W, perteneciente al municipio de Zona Bananera del departamento del Magdalena, localizado en dirección suroriente de la Ciénaga Grande de Santa Marta y con cercanías a la Sierra Nevada de Santa Marta.

De acuerdo a los requerimientos de Promigas S.A E.S.P para el desarrollo de su infraestructura, se seleccionó una franja cuyas dimensiones son de 50 km de largo y 600 metros de ancho de la cual se realizó un vuelo el día 02 de diciembre de 2014 para obtención de datos LiDAR con densidad de 4 ptos/m<sup>2</sup> y ortofotomosaico con cámara aérea RGB (Red, Green, Blue) con resolución espacial de 10cm.

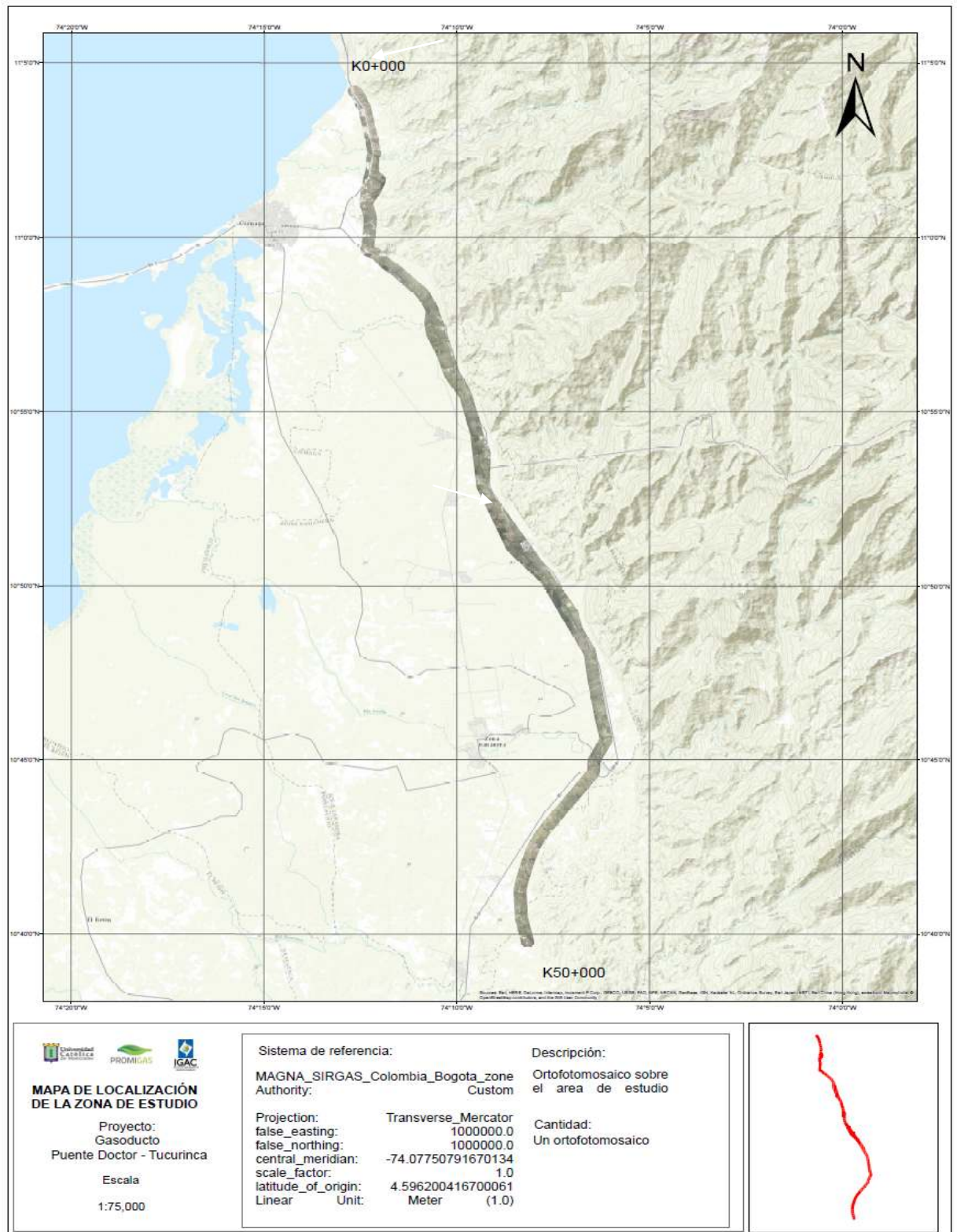


Figura 10. Franja seleccionada para toma de datos LiDAR y ortofotografía. Fuente: Elaboración propia, 2016.

Como se mencionó anteriormente, Esta franja es el aérea de trabajo principal para el postprocesamiento de las imágenes y su análisis para extraer la información.

En la zona para el desarrollo del estudio, se destacan algunas características que permiten tener una visión general de las condiciones de terreno [Promigas, \(2104\)](#), de las cuales se mencionan:

- Lomas y ondulaciones: Localizadas hasta los 100 metros sobre el nivel del mar, con una altura relativa menor de 50 metros, específicamente en el sector de Cordobita salida a las canteras, su inclinación general varía entre el 7 y el 12%, con longitud inferiores a 50 metros, formas convexas, cimas planas a redondeadas y valles abiertos poco profundos. Presenta un patrón de drenaje de tipo dendrítico y subdendrítico con una densidad media y su grado de disección es ligero.
- Lomas: se encuentran aproximadamente desde 60 hasta 220 msnm, con una altura relativa que varía según su ubicación, una menor a 50 m y otra en cercanías de la cuenca del Ariguaní de 50 a 200 m. Su inclinación general varía entre el 12 y el 25%, con una longitud, menor a 50 m, formas convexas, cimas redondeadas y valles poco profundos. Presenta un patrón de drenaje de tipo subdendrítico a dendrítico con una densidad alta a media y su grado de disección es moderado.
- Lomas y colinas: localizadas entre los 25 y 200 msnm con una altura relativa menor a 50 m. Su inclinación general varía entre el 7 y el 12%, con una longitud inferior a 50 m, formas convexas, cimas planas y redondeadas y valles abiertos poco profundos. Presenta un patrón de drenaje de tipo dendrítico con una densidad media a baja y su grado de disección es moderado.
- Pequeños valles: localizados entre 20 y 150 msnm con una altura relativa inferior a 50 m. Su inclinación general varía entre el 0 y el 3%, con 50 a 100 m de

amplitud, formas rectas, valles abiertos poco profundos. Presenta un patrón de drenaje de tipo subparalelo a dendrítico con una densidad media y su grado de disección es ligero.

- Glacis de erosión-pedimento: localizado entre 80 y 150 msnm aproximadamente, con una altura relativa menor a 50 m. Su inclinación general varía entre el 3 y el 7%, con 50 a 100 m de longitud, formas rectas, cimas planas y valles poco abiertos poco profundos. Presenta un patrón de drenaje de tipo dendrítico con una densidad baja y su grado de disección es ligero.

## **7.2. INSUMOS**

Se debe resaltar que es la primera vez que Promigas S.A E.S.P, emplea el sensoramiento remoto tipo LiDAR en proyectos de infraestructura de gasoductos, debido a que siempre se ha empleado métodos convencionales de topografía.

En el presente de subcapítulo se describe, a manera informativa, la etapa del preprocesamiento contratado para la generación de los datos vectoriales LiDAR y mosaico de la ortofotografía [Promigas, \(2014\)](#). Donde se consideraron parámetros como procesamiento geodésico, PODP, numero de satélites, error medio cuadrático, entre otros.

A partir del subcapítulo 7.3 se toma estos insumos para el análisis del territorio, aplicando diferentes metodologías de procesamiento sugeridas por el autor en cumplimiento de los objetivos de la investigación.



### 7.2.1. PARAMETROS DEL VUELO

El vuelo se realizó el 02 de Diciembre de 2014 para la zona de estudio localizada en el departamento del Magdalena, a una altura de vuelo de 1000 (3280.8 ft) metros obteniendo un GSD de diez (10) centímetros, una densidad de 4.53 puntos/m<sup>2</sup> y fotografías de 1078x808 pixeles.

En la tabla 1 se presentan los parámetros técnicos del desarrollo del vuelo.

Tabla 1. Parámetros de vuelo.

<b>ALTURA</b>	<b>Metros (m)</b>	<b>Pies (ft)</b>
	<b>800</b>	<b>2624</b>
<b>VELOCIDAD</b>	<b>50mts/s-97nd</b>	
<b>FOV</b>	<b>45</b>	
<b>PRR</b>	<b>300</b>	
<b>TAMAÑO</b>	<b>862x646mts</b>	
<b>DENSIDAD DE PUNTOS</b>	<b>4.53</b>	
<b>CANTIDAD</b>	<b>4.53</b>	
<b>PLAN DE VUELO</b>	<b>1 VECES</b>	
<b>GSD</b>	<b>0.10</b>	

Fuente: Promigas, 2014.

El área levantada tiene las siguientes dimensiones: 50 km de largo, 600 metros de ancho para un área total de 30 km<sup>2</sup>.

### 7.2.2. PROCESAMIENTO GEODÉSICO

El procesamiento de la información se realizó con el programa POSPAC, programa con el cual se define, calcula y procesa la trayectoria del avión y los fotocentros de

las imágenes asociados a la información obtenida por medio del receptor GNSS del avión.

El método de procesamiento utilizado para esta navegación es el de "single baseline" (línea de base sencilla), el uso de esta metodología permite obtener una adecuada precisión posicional de los datos contando con información geodésica de bases instaladas en campo durante el vuelo, el sistema de referencia es el MAGNA SIRGAS Datum oficial para Colombia establecido por INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI (I.G.A.C.). Con proyección de coordenadas a planas de Gauss Kruger origen BOGOTA-MAGNA.

El Datum vertical de referencia para ajustar las alturas sobre el nivel medio del mar, se denomina Datum BUENAVENTURA del IGAC. Todas las alturas para los diferentes productos se presentan así, aplicando para la obtención de estas la GUÍA METODOLÓGICA PARA LA OBTENCIÓN DE ALTURAS SOBRE EL NIVEL MEDIO DEL MAR UTILIZANDO EL SISTEMA GPS, con ocupación de NP's (Puntos pertenecientes a las líneas de nivelación de precisión IGAC) para mejorar la precisión del GEOCOL2004.

En la Figura 11 se puede observar el procesamiento de navegación del vuelo para el día 02 de Diciembre de 2014 con el método single base line (línea de base sencilla).

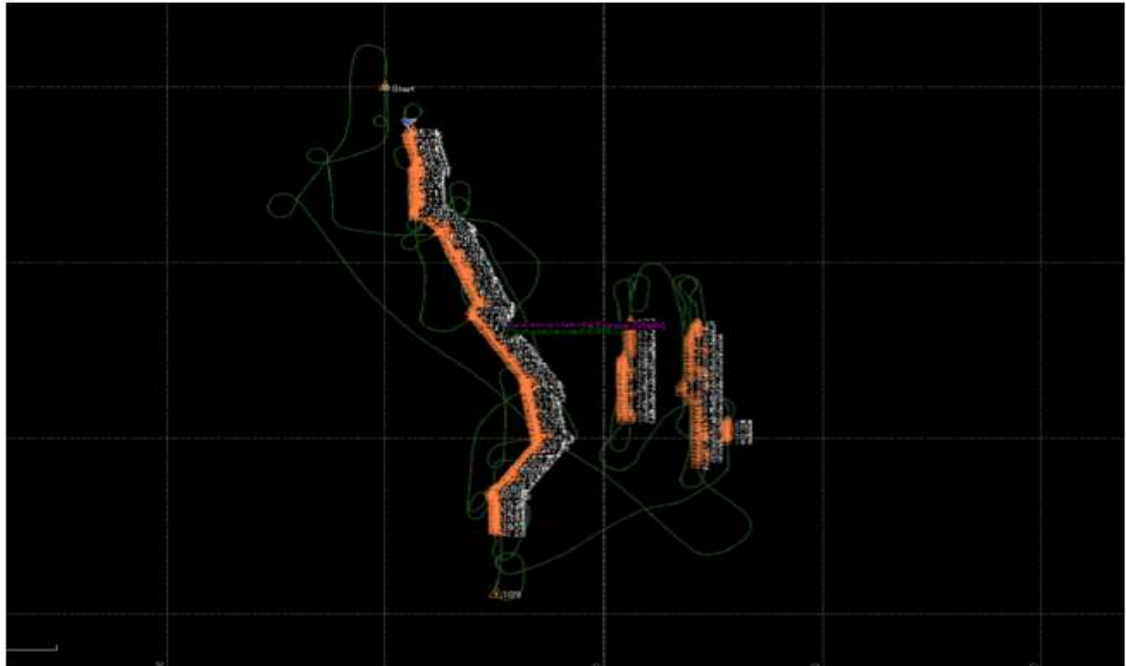


Figura 11. Visualización en el software POSPAC de la línea de vuelo. Fuente: Promigas, 2014.

### 7.2.3. ERROR MEDIO CUADRÁTICO (RMSE)

El error medio cuadrático define la precisión posicional de la información geodésica capturada y procesada para cada uno de los ejes coordenados.

En la Figura 12 se aprecia el error medio cuadrático posicional de las coordenadas X, Y y Z de la información geodésica del vuelo al ser procesado con la metodología "*single baseline*". Los errores mínimos cuadrados durante el vuelo fueron de 6.6 cm en la coordenada de altura, en la coordenada Norte fue de: 2.2 cm y para la coordenada Este fue de: 2.5 cm.

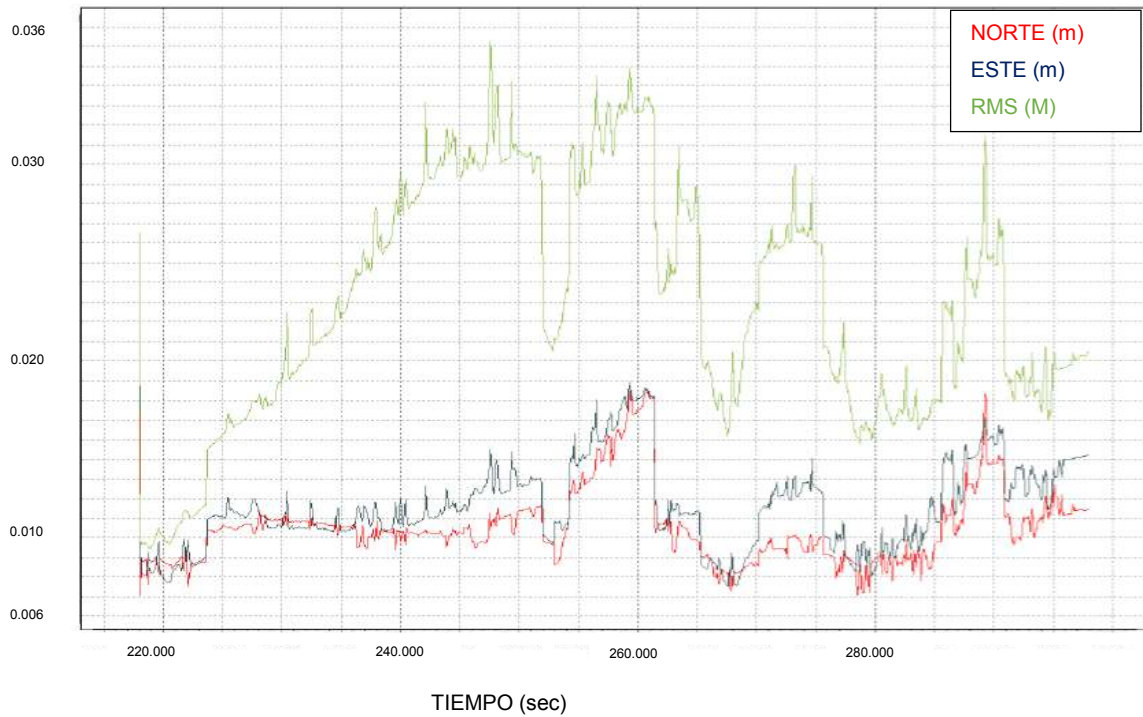


Figura 12. Gráfico de error medio cuadrático, rojo: norte, azul; este, verde; altura. Fuente: Promigas, 2014.

#### 7.2.4. NUMERO DE SATÉLITES

Para lograr una buena determinación de coordenadas por medio del uso de receptores GNSS, es preciso contar con observación simultánea de al menos 5 satélites.

En la Figura 13 se muestra el gráfico que relaciona el número de satélites enlazados al sistema del avión a la hora de la toma de los datos durante el vuelo del día 02 de diciembre de 2014.

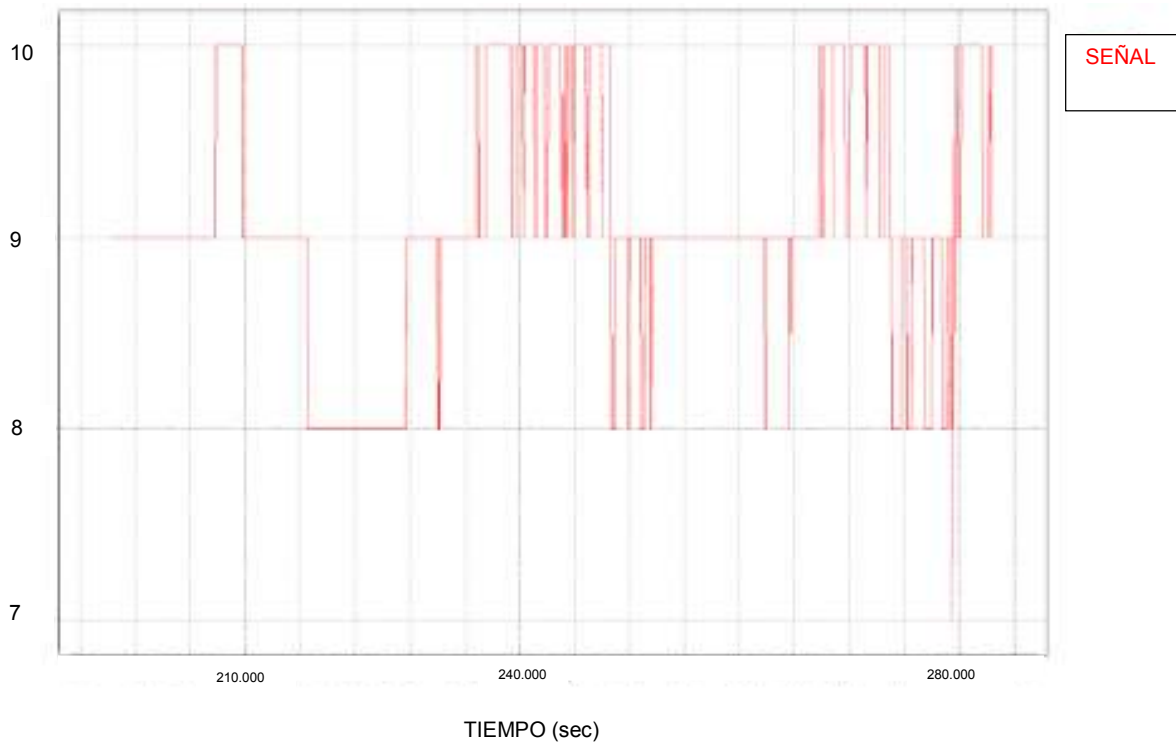


Figura 13. Gráfica de numero de satélites sobre el área de estudio para el día 02/12/14. Fuente: Promigas, 2014.

### 7.2.5. PDOP (POSITIONAL DILUTION OF PRECISION)

El PODP (Positional Dilution of Precision) hace referencia a la configuración geométrica de los satélites en el momento de la captura de los datos por la antena del receptor GNSS en el avión. Si este error se encuentra por debajo de 5 se considera un dato confiable.

Para el vuelo ejecutado el día 02 de Diciembre el 2014 el PODP máximo que se obtuvo fue de: 3.5 como se muestra en la Figura 14.

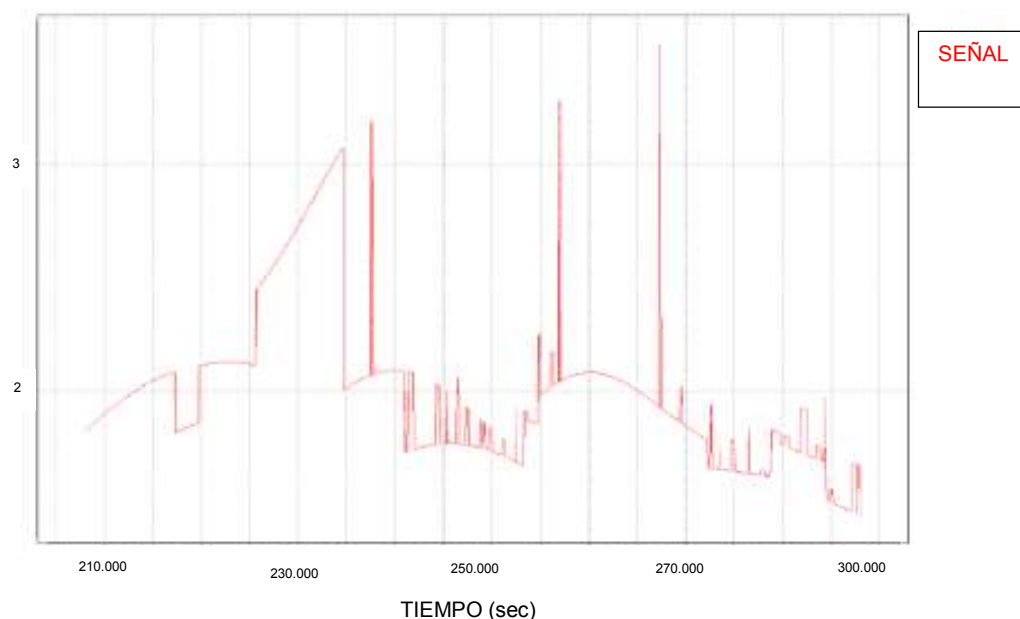


Figura 14: Visualización del PDOP sobre el área de estudio para el día 02/12/14. Fuente: Promigas, 2014.

### 7.2.6. PREPROCESAMIENTO DE LA NUBE DE PUNTOS

Empleando el programa LPMaster se combina la información proveniente del procesamiento geodésico en el programa Pospac, junto con los archivos crudos con extensión SDC perteneciente a los datos LiDAR y los TACPhotold con extensión TXT. Se generó la nube de puntos LiDAR obtenida por medio de la captura laser luego de los respectivos ajustes planimétricos y altimétricos.

En la Figura 15 se observa las áreas de cobertura de los datos LiDAR procesados en el programa LP Master. De este procesamiento también se extraen los fococentros de las imágenes tomadas.

En este paso se realiza en ajuste planimétrico correspondiente entre tomas de varios días los cuales sirven para hacer ajustes en 2D (xy) en caso de presentarse desplazamientos relativos en la información, este ajuste se muestra en la Figura 16.

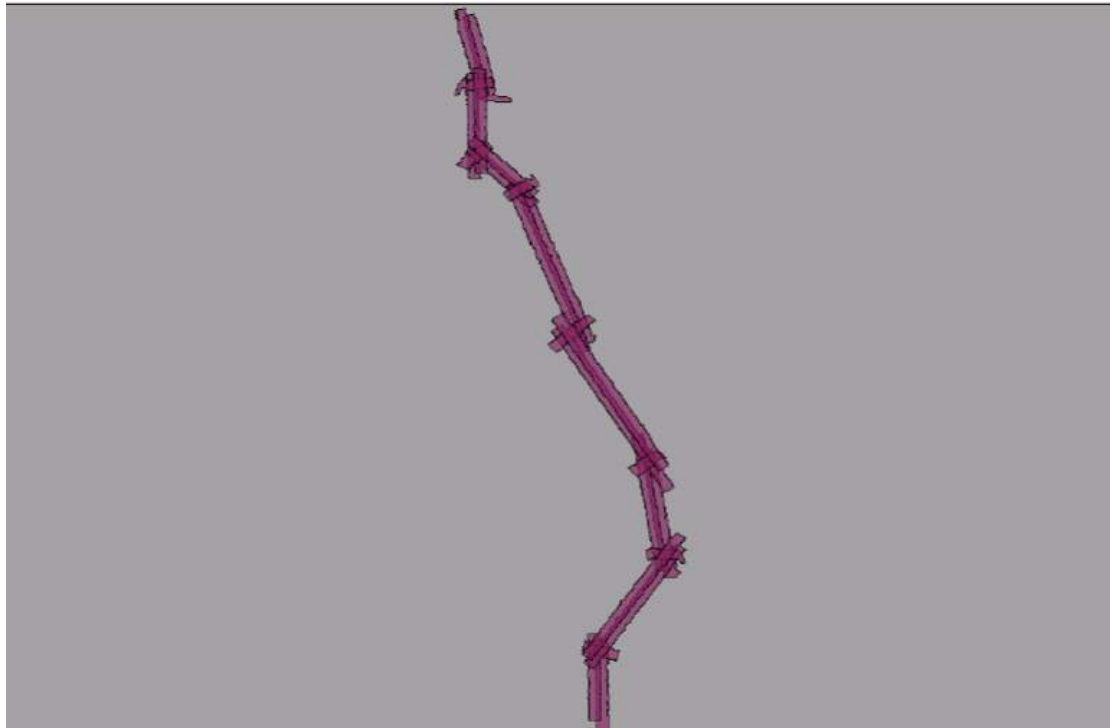


Figura 15. Uso del software LPMaster para el preprocesamiento de los datos LiDAR. Fuente: Promigas, 2014.

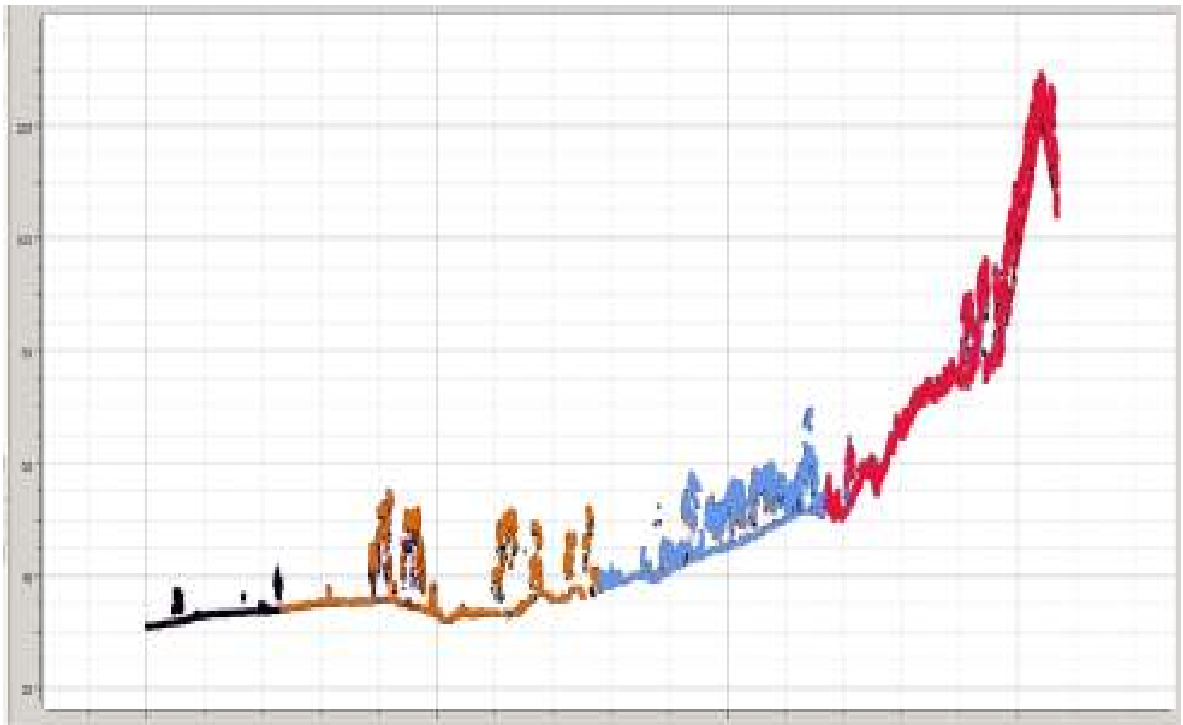


Figura 16. Ajuste de perfil de los datos LiDAR empleando el software LPMaster. Fuente: Promigas, 2014.

Este ajuste se realiza para llevar las alturas de las fajas a una sola para que queden en la misma altura de referencia.

En LPMaster paralelamente se genera el proyecto que contiene el bloque de fotografías que servirá para generar el Ortofotomosaico de las imágenes obtenidas con la cámara del sensor. En este paso se genera la orientación exterior de las fotos en cada una de las tomas de la información, dicha orientación está conformada por X, Y, Z, Omega, Phi y Kappa.

### **7.2.7. ORTOFOTOMOSAICO**

Para la obtención del Ortofotomosaico es necesario realizar un ajuste a las imágenes respecto al modelo digital de terreno, para este proceso se utiliza la herramienta '*Orthomaster*', propia del programa APPLICATIONSMaster, al final de este proceso se tienen las imágenes ortorectificadas garantizando así su validez cartográfica.

Las ortoimágenes obtenidas se procesan en el software ORTHOVISTA, el cual de forma automática realiza una elección preliminar de las imágenes útiles y define las líneas de corte para empalmar las imágenes. El mosaico preliminar se somete a una exhaustiva revisión en la cual se busca identificar los posibles errores en el empalme de las ortoimágenes, esta revisión se hace con ayuda de software SIG generando un archivo SHP en el que se destaca la ubicación de dichos errores.

Una vez que se conocen las zonas con problemas en el mosaico preliminar se procede a editar las líneas de corte para garantizar una debida continuidad en la imagen, dicha edición se realiza en el programa SEAM EDITOR y una vez terminado este proceso se vuelve a generar un nuevo Ortofotomosaico con las líneas de corte



que han sido editadas. A esta versión final del Ortofotomosaico se le realizan ediciones finales con el programa ORTHOVISTA como el corte final del área de interés y una ecualización para mejorar la visualización, este proceso se realiza con la herramienta 'RadioMetrix' de ORTHOVISTA .

### **7.3. POSTPROCESAMIENTO Y EXTRACCIÓN DE INFORMACIÓN**

#### **7.3.1. MODELO DIGITAL DE ELEVACION, MODELO DIGITAL DE TERRENO Y CLASIFICACION DE NUBE DE PUNTOS LiDAR**

De ahora en adelante, se describirá la metodología empleada por el autor para el postprocesamiento de la nube de puntos y ortofotomosaico con el propósito de extraer la mayor cantidad de información posible y de interés para el análisis del territorio de acuerdo con los objetivos del proyecto en comparación con los métodos tradicionales de levantamiento topográfico, en concordancia con la justificación del proyecto de investigación.

Repasando las características del área de estudio, se recuerda que tiene en total 30 km<sup>2</sup> (50 km de largo por 600 metros de ancho). Por tamaño, existe una limitante con respecto a la configuración de hardware de la capacidad del equipo usado en la presente investigación para cargar los datos, debido a los miles de datos X,Y,Z derivado de la nube de puntos y la resolución espacial del ortofotomosaico (10 cm), lo que la hace imposible de emplear técnicas de procesamiento en toda la extensión de la imagen completa de forma eficiente. Por lo tanto, es necesario reducir el tamaño de los archivos (LiDAR y Ortofotomosaico) para minimizar la exigencia del hardware del recurso informático, siendo la cuadrícula la forma más adecuada.

Para poder aplicar lo anterior, se debe generar una cuadrícula en Shapefile empleando el software Arcgis; esta cuadrícula cubre toda la zona de interés y cada cuadro se dimensionó en 1km<sup>2</sup>. La cuadrícula en sus abscisas están nombradas de forma alfanumerica (A-Z) y en sus ordenadas de forma numérica (1-92). Como se mencionó anteriormente, la capacidad de visualizar y procesar depende de las características del equipo, siendo esta área más adecuada por su tamaño.

Para un procesamiento óptimo se recomienda como mínimo las siguientes características del equipo:

- Procesador intelcore i7 4072MQ 2.2 Ghz
- Memoria RAM de 12 GigaBites
- Tarjeta gráfica NVIDIA de 2 GigaBites integrada

Una vez definida la cuadrícula, se debe separar cada cuadro relacionado (de ahora en adelante “plancha”) de la información LiDAR y el ortofotomosaico, con el propósito de darle coherencia. Por ejemplo:

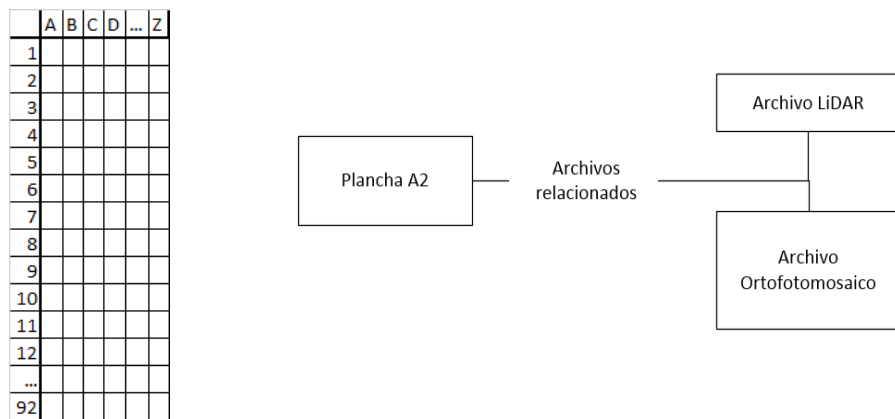


Figura 17. Esquema distribución cuadrícula Y Relación plancha con archivos LiDAR y Ortofotomosaico. Fuente: Elaboración propia, 2016.

Por ejemplo: La plancha A2 contiene información LiDAR con nombre A2 e información de Ortofotomosaico con nombre A2.

Igualmente se elaboraron mapas de planchas para una mejor ilustración de la distribución de las mismas para facilitar su interpretación. (Ver a continuación)



Figura 18. Mapas de distribución de planchas. Mapa 1 de 5. Fuente: Elaboración propia, 2016.

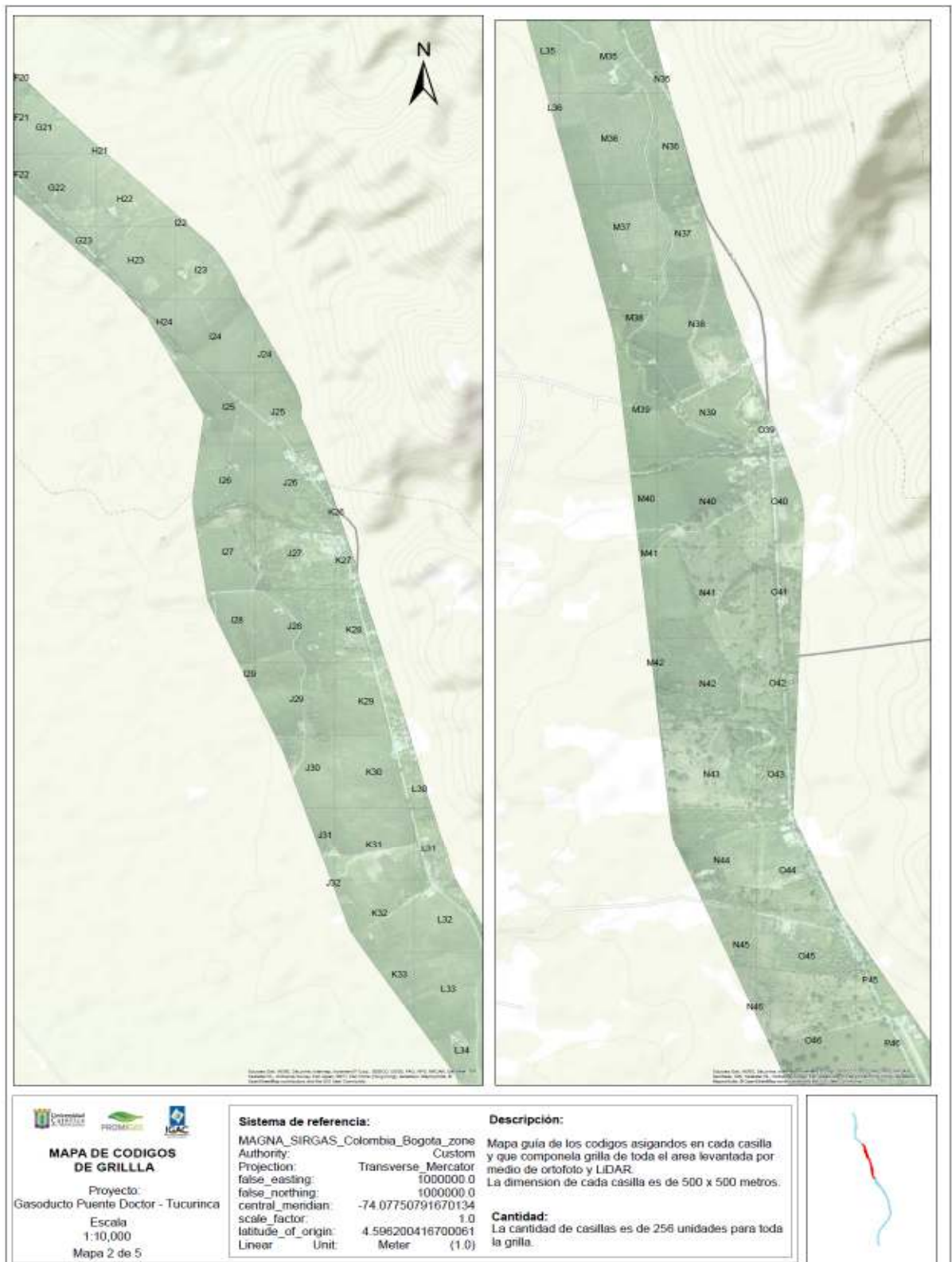


Figura 19. Mapas de distribución de planchas. Mapa 2 de 5. Fuente: Elaboración propia, 2016.



Figura 20. Mapas de distribución de planchas. Mapa 3 de 5. Fuente: Elaboración propia, 2016.



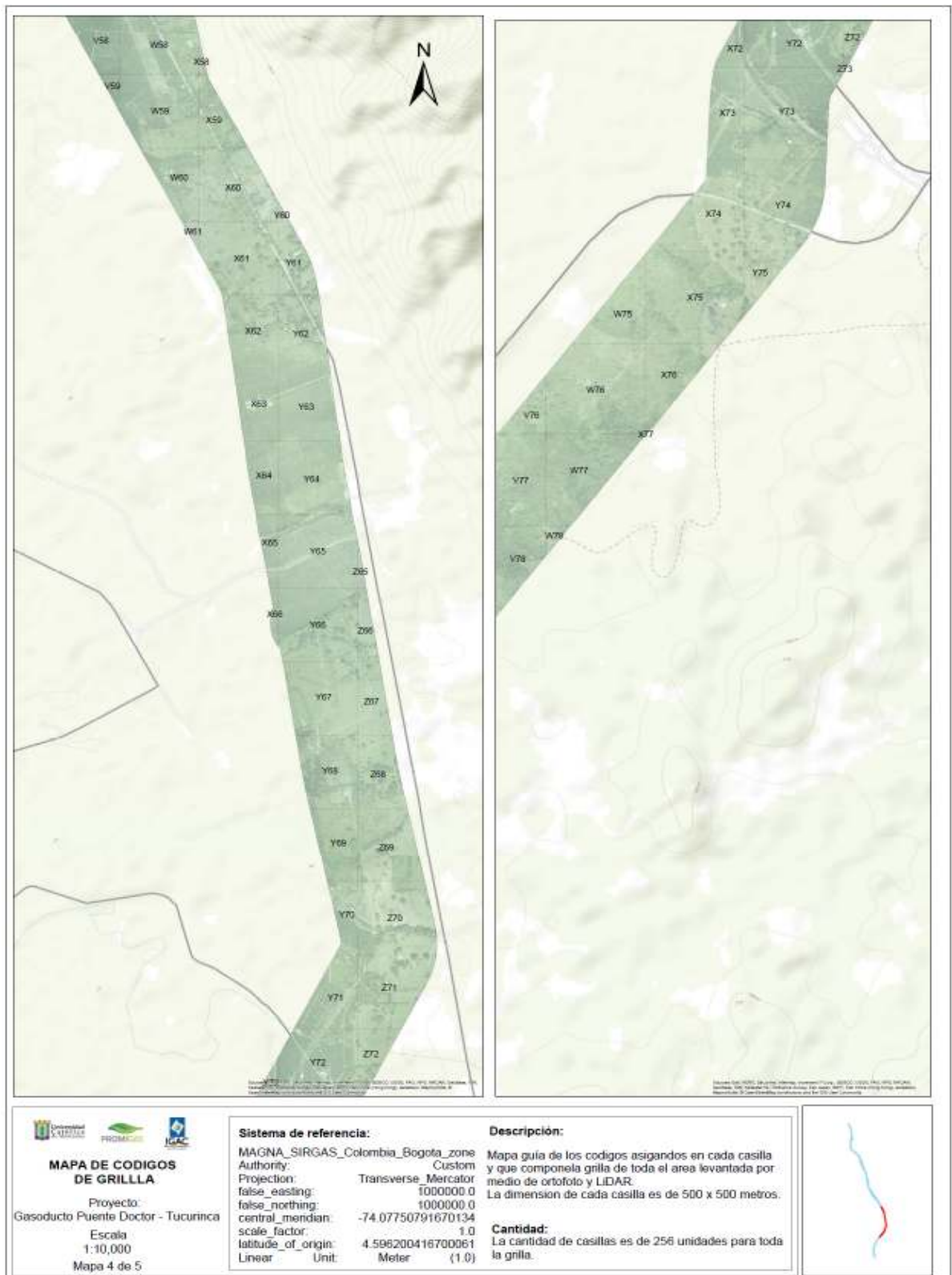


Figura 21. Mapas de distribución de planchas. Mapa 4 de 5. Fuente: Elaboración propia, 2016.

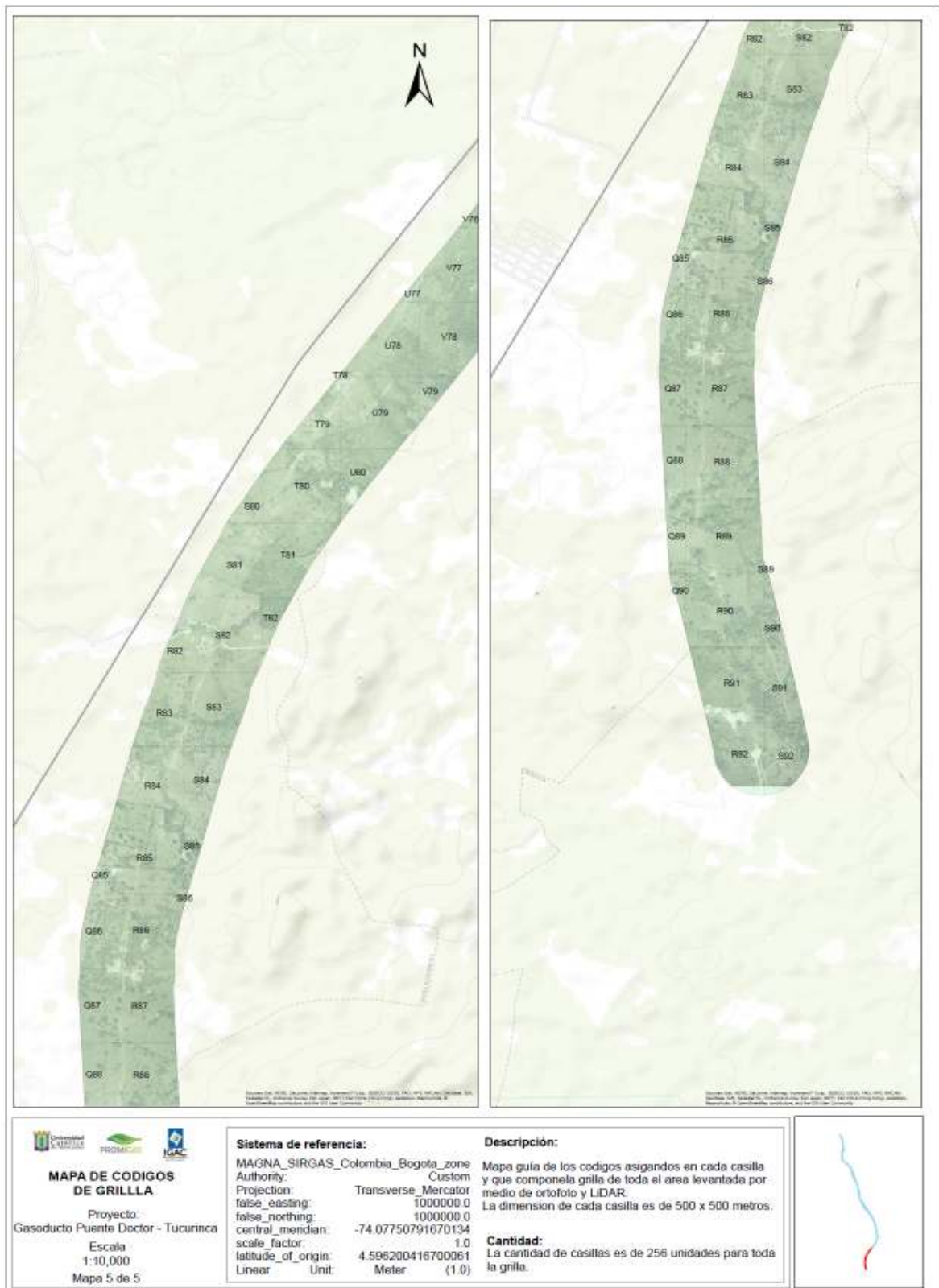


Figura 22. Mapas de distribución de planchas. Mapa 5 de 5. Fuente: Elaboración propia, 2016.



### 7.3.1.1. FILTRO DE LA NUBE DE PUNTOS

Durante la etapa de preprocesamiento, uno de los efectos desafortunados que se presentan con el LiDAR es la presencia de puntos a muy alta o baja elevación con respecto al terreno. Estas variaciones son conocidas como ruido y pueden ser causados por presencia de diferentes elementos como aerosoles, pájaros, entre otros o pueden ser de tipo instrumental. Desde luego, este tipo de información no deseada se puede remover por procesos automáticos. Una herramienta útil es el software comercial LASTOOLS el cual dispone de algoritmos para este tipo de alcance. Pero aun así debe someterse a una rigurosa inspección visual para remover los residuos de forma manual que no reconoció el algoritmo. En la figura 23 se puede observar el ruido sobre la nube de puntos del archivo.

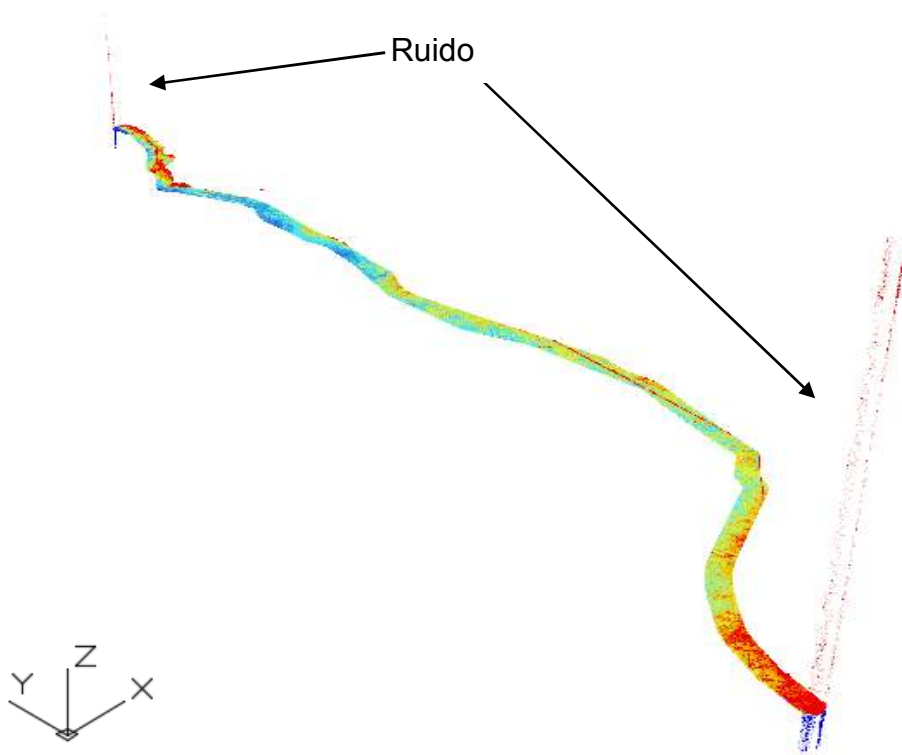


Figura 23. Presencia de ruido sobre la nube de puntos LiDAR. Fuente: Elaboración propia, 2016.

En el presente estudio, no se dispone de un software con algoritmos especializados para el filtraje del ruido. Por lo que es necesario realizar una inspección visual de cada uno de los archivos y eliminar manualmente todo aquel que no esté relacionado con elementos pertenecientes al terreno. La gran desventaja de este método es el consumo de tiempo pero los resultados son los más satisfactorios.

Una correcta depuración de los puntos es de gran importancia para una buena representación del terreno. Haciendo un comparativo de los métodos topográficos tradicionales para levantamiento de áreas de territorio, la diferencia con respecto al LiDAR en la cantidad de mediciones disponibles es abrumadora. Para la topografía tradicional se realiza levantamientos elaborando secciones transversales con respecto al eje de diseño de máximo 50 metros de largo en ambos lados, tomando un punto de datos en lo posible cada metro de distancia y las secciones tienen una separación de 20 metros. Si se hace el cálculo para una longitud de 100 metros, la densidad sería de unos 0.05 puntos de medición por metro cuadrado de superficie. El LiDAR usado en el presente estudio, levanta 4 puntos de datos por metro cuadrado de superficie. Y empleando la misma relación de distancia longitudinal de los 100 metros y 100 metros de ancho. Se tiene disponible 40.000 puntos de medición por metro cuadrado de superficie. Es decir, 800.000 veces más información del terreno que un levantamiento convencional.

#### **7.3.1.2. CLASIFICACION DE LA NUBE DE PUNTOS Y SUBPRODUCTOS**

Una vez superado el filtrado, ya se cuenta con una apropiada nube de puntos. Es importante mencionar que cada punto contiene información en el metadato; el cual conserva características del pulso láser sobre el terreno (alturas, retorno, intensidad, entre otros) y por lo tanto son útiles a la hora de aplicar algoritmos de clasificación. Dentro de las más importantes se encuentra el “retorno”, el cual indica la pérdida de

la intensidad/tiempo del punto a la hora de su retrodispersión, así como el posicionamiento x,y,z y el nivel de intensidad.

Ahora bien, es necesario aplicar estas técnicas de clasificación para poder distinguir las principales coberturas. Dentro del alcance del estudio se necesitan tres: suelo, vegetación y viviendas. Se excluyeron las líneas de energía de alta, media y baja tensión ya que la densidad no fue lo suficientemente como para que el algoritmo de clasificación las identificara como una cobertura.

Debido a esta limitante se recomienda la aplicación de métodos manuales, este consiste en delinear manualmente las líneas de energía y ubicar las torres de alta y mediana tensión, usando como apoyo la ortofotografía y la nube de Puntos para distinción de alturas.

El flujo para la clasificación de la nube de puntos se dividió en dos, y se empleó el software comercial Global Mapper para su aplicación. En la primera parte se procedió con la clasificación del suelo de la nube de puntos y la segunda en la generación del DTM.

Para el terreno se debe aplicar técnicas de filtraje mediante el uso de algoritmos morfológicos como el de [Vosselman, \(2000\)](#). El cual describe la altura diferencial admisible en función de la distancia horizontal donde a menor diferencia entre vecinos más probable de ser parte al terreno. <sup>2</sup>

Es decir, el algoritmo toma patrones de la nube de puntos y los analiza con respecto a su altura media y su distancia horizontal. Por cuestión de probabilidad, lo más

---

<sup>2</sup> Existen otros tipos de filtros para datos LiDAR como variante de filtro morfológico. Sithole (2001), densificación progresiva. Axelsson (2000), filtro basado en superficie. Krauss (1998). Por mencionar algunos.

seguro es que los vecinos más cercanos tenga las mismas características del foco de medición, por lo tanto, harían parte del mismo terreno.

Igualmente se le da importancia a las otras características de los puntos, como el “último retorno”, este se calcula por la pérdida de intensidad del pulso a medida que pasa sobre las coberturas vegetales hasta llegar al suelo y generar la retrodispersión o reflejo de la energía. Sin embargo, hay que tener cuidado porque en las zonas de existe alta concentración de vegetación, la densidad de la biomasa absorbe la intensidad del pulso antes de llegar al suelo, lo que desencadena en visualización de información no correspondiente con la realidad del terreno a nivel de piso. El área de estudio se caracteriza principalmente por presentar cultivos permanentes y transitorios, con poca densidad lo que da un margen de confiabilidad en la toma de los datos LiDAR. Una vez generada la clasificación del terreno, es imperioso una revisión y ajuste manual de la misma, esto debido a que en ciertos lugares se pueden detectar errores como confundir baja vegetación con terreno. Algo que en efecto, no representa la realidad. Un factor importante de este ajuste es la pericia del intérprete de la información porque de él depende hacer una limpieza adecuada de los datos.

En las imágenes a continuación se puede observar el tipo de información almacenada en el levantamiento LiDAR y que es útil para procesos de clasificación.

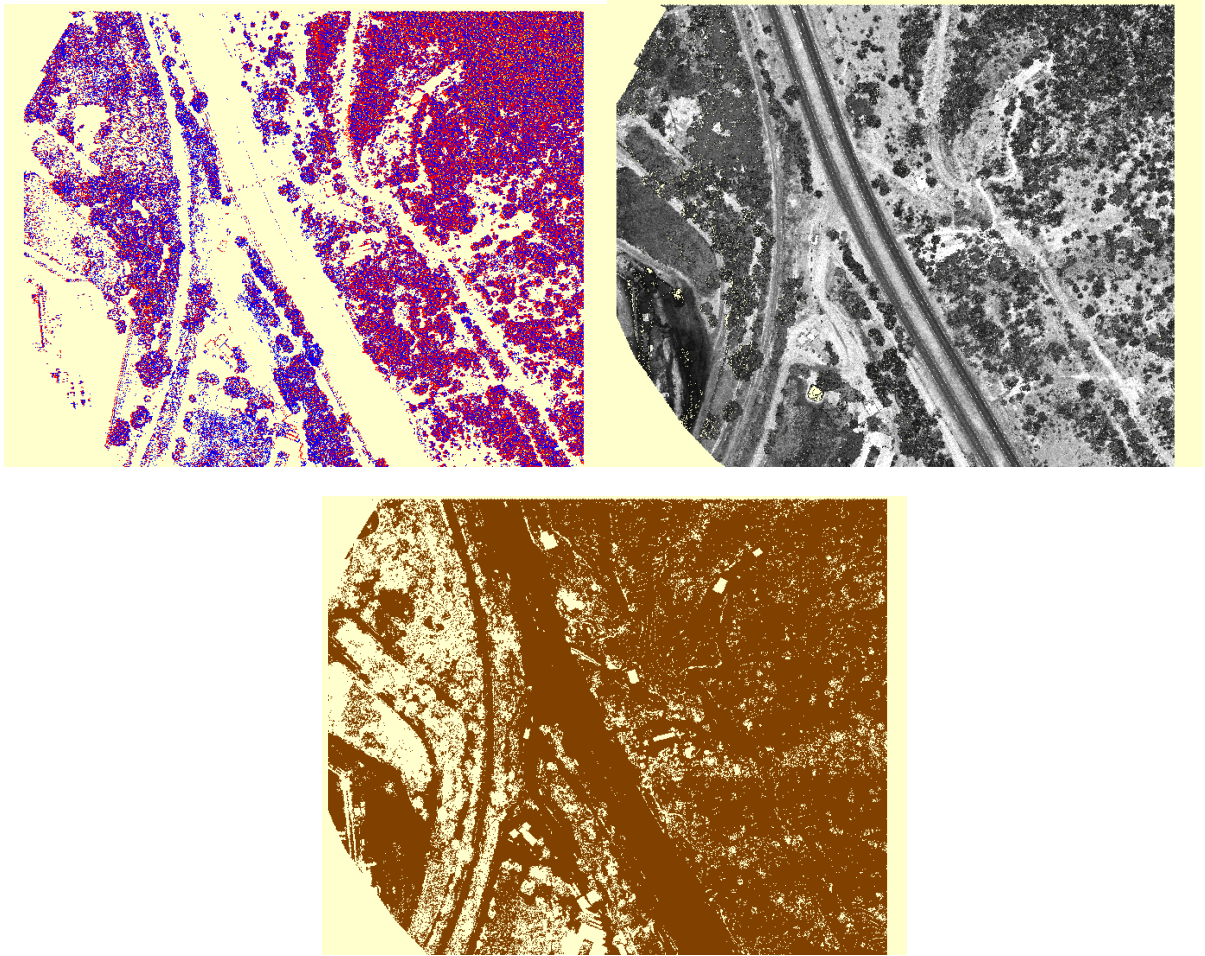


Figura 24. Imagen de segundo y tercer retorno LiDAR (Izq), Imagen de intensidad del LiDAR (Der.), Imagen de nube de puntos clasificada como "suelo"(inf.). Fuente: Elaboración propia, 2016.

La imagen de la izquierda corresponde al segundo y tercer retorno de la intensidad del láser reflejado sobre la superficie, generalmente sobre zonas arbustivas. La imagen de la derecha refleja la intensidad del LiDAR sobre la superficie levantada. La imagen inferior son los puntos clasificados como suelo una vez se ejecuta la filtración.

Una vez depurado los puntos se genera el DTM y DSM. Cuya definición general es la función continua que mapea el terreno planimétrico 2D a elevación z del mismo (Fleming et al., 2010). Los espacios son rellenados por medio de procesos de

interpolación donde los valores de los píxeles más cercanos son la línea base para el cálculo.

Una característica importante es que la generación del DTM permite develar aquellos detalles ocultos bajo vegetación densa. La diferencia con métodos topográficos tradicionales radica en el nivel de detalle ligado a la cantidad de mediciones por área de superficie como se explicó anteriormente. Por lo que al generar un modelo de superficie sobre una topografía tradicional, se obtiene como resultado, un terreno con menor grado de precisión en la distribución espacial del relieve representado. Adicionalmente, los tiempos muertos que incurren debido a las dificultades en el acceso, permisos legales y extensas jornadas de trabajo. Algo que el LiDAR no tendría inconvenientes por ser una técnica no invasiva, eliminando completamente esta dificultad.

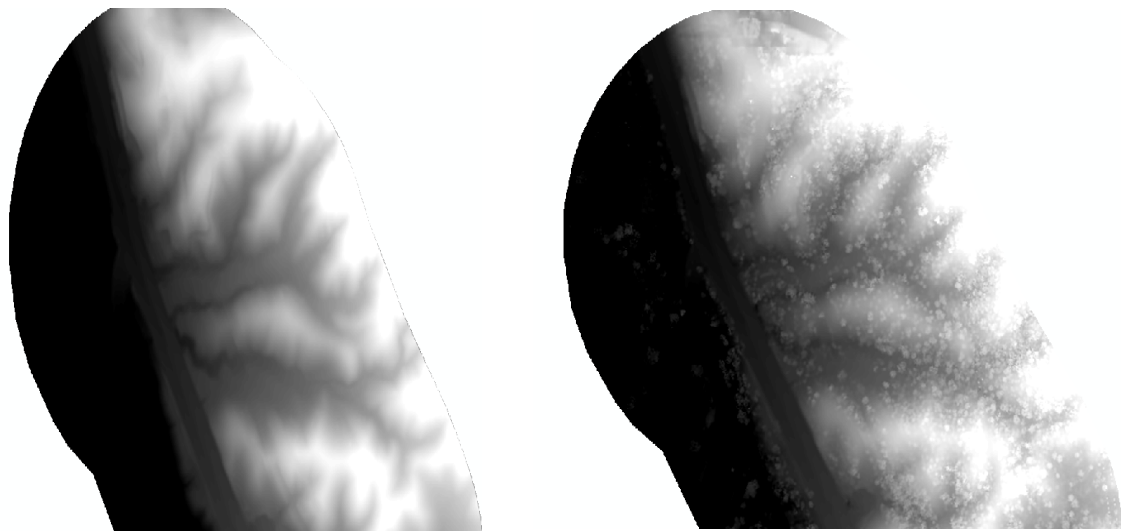


Figura 25. Imagen DTM extraída de la nube de puntos clasificada como "suelo" (Der.), Imagen DSM con todas las componentes de la superficie (árboles, casas, etc.) (Izq.). Fuente: Elaboración propia, 2016.

El DTM es un insumo de entrada para otros estudios que serán explicados en los capítulos de más adelante.

Recordando que el DTM es la representación del terreno sin elementos sobre su superficie como son los árboles, casas, torres eléctricas, etc. Después de aplicar algoritmos de filtración. En el caso del DSM no se hace necesario ninguna filtración de datos porque se desea mostrar en efecto toda la superficie del terreno con todos sus componentes, como los elementos anteriormente mencionados.

La segunda parte del filtro sobre la nube de puntos corresponde a la clasificación de la vegetación y las viviendas. Al igual que con el terreno, se aplican algoritmos de tipo morfológico para la clasificación. La diferencia radica en los parámetros que se toman en cuenta para realizarlo. Con respecto a las viviendas, existen patrones que son identificables al observar una imagen LiDAR; como la relativa homogeneidad en la distribución de la superficie, su forma (generalmente rectangular), altura y el cambio brusco en la inclinación de la pared-superficie. En cambio la vegetación, se destaca la concavidad de la copa de los árboles y su altura por mencionar algunos. Basado en esto, se aplican técnicas de cluster donde se define el rango de los parámetros principales para que los algoritmos los identifiquen y le dé un valor de importancia para su posterior clasificación.<sup>3</sup>

No obstante, al igual que la primera parte donde se definió los puntos pertenecientes al terreno. Fue necesario emplear un filtraje manual para refinar la clasificación de los puntos dentro estos dos grupos.

Existen varios paquetes de software, ya sean pagos o de uso libre, cada uno con sus algoritmos para separar las coberturas de interés de la nube de puntos. Los resultados de cada uno pueden variar de forma muy notable, esto debido a la complejidad del algoritmo que se incluye en el software. Aunque también depende de la calidad de la nube de puntos y el terreno donde se obtuvo la información.

---

<sup>3</sup> Para ampliar acerca de los algoritmos de clasificación de nubes de puntos e identificación de viviendas y vegetación se referencia a Jain (1999); Duda (2001) y Berkhin (2001).

Vale la pena indicar que un factor importante a la hora de la toma de la información durante el vuelo es la topografía del terreno. Cuando la superficie es muy escarpada debido a la presencia de montañas y acantilados con ángulos de 90°, se hace conveniente el paso en más de una vez del sensor laser porque el haz de luz no cubre toda la zona de interés por el tipo de obstáculo, lo que se reflejaría en una calidad no satisfactoria e irreal de la nube de puntos y por ende sus derivados (Wehr, 2009).

En la figura 26 se puede observar los resultados de la nube de puntos clasificada por medio de algoritmos y ajustada manualmente. El gran volumen de puntos LiDAR permite generar una clara visualización de la configuración de la superficie, como su vegetación, viviendas e infraestructura. Algo que con métodos convencionales es imposible a ese nivel de detalle debido a la poca disponibilidad de mediciones por área de superficie. Lo que representa una ganancia en el volumen de información disponible.

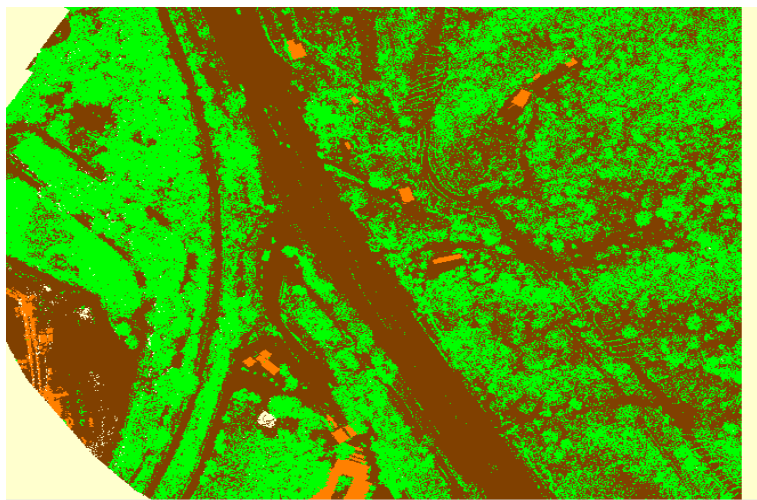


Figura 26. Imagen de la nube de puntos clasificada en Suelo, vegetación y edificaciones. Fuente: Elaboración propia, 2016.



### 7.3.1.3. RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Una correcta depuración de los puntos es de gran importancia para una buena representación del terreno. Haciendo un comparativo de los métodos topográficos tradicionales para levantamiento de áreas de territorio con respecto al LiDAR, la diferencia en la cantidad de mediciones disponibles es abrumadora. Para la topografía tradicional, se , elaboran secciones transversales con respecto al eje de diseño de máximo 50 metros de largo en ambos lados, tomando un punto de datos en lo posible cada metro de distancia y las secciones tienen una separación de 20 metros. Si se hace el cálculo para una longitud de 100 metros, la densidad sería de unos 0.05 puntos de medición por metro cuadrado de superficie. El LiDAR usado en el presente estudio, levanta 4 puntos de datos por metro cuadrado de superficie. Y usando la misma relación de distancia longitudinal de los 100 metros y 100 metros de ancho. Se tiene disponible 40.000 puntos de medición. Es decir, 800.000 veces más información del terreno que un levantamiento convencional.

El gran volumen de puntos LiDAR permite generar una clara visualización de la configuración de la superficie, como su vegetación, viviendas e infraestructura. Algo que con métodos convencionales es imposible a ese nivel de detalle debido a la poca disponibilidad de mediciones por área de superficie. Lo que representa una ganancia en el volumen de información disponible. Adicionalmente, la ganancia de tiempo es importante, debido a que con la tecnología LIDAR desde el vuelo hasta la entrega de los productos para un área de 30 km<sup>2</sup>, se demora unos 30 días aproximadamente. La misma área con métodos tradicionales tomaría unos 600 días, empleando una sola comisión topográfica. Es decir 20 veces más rápido en tiempo de ejecución.

El DTM permite develar aquellos detalles ocultos bajo vegetación densa. La diferencia con métodos topográficos tradicionales radica en el nivel de detalle ligado a la cantidad de mediciones por área de superficie como se explicó anteriormente. Por lo que al generar un modelo de superficie sobre una topografía tradicional, se

obtiene como resultado, un terreno con menor grado de precisión en la distribución espacial del relieve representada. Adicionalmente, los tiempos muertos que incurren debido a las dificultades en el acceso, permisos legales y extensas jornadas de trabajo. Algo que el LiDAR no tendría inconvenientes por ser una técnica no invasiva, eliminando completamente esta dificultad.

La nube de puntos es el insumo primario para la generación de derivados, los cuales son importantes en la aplicación de diversas áreas de conocimiento como la geología, hidrología e hidráulica. Por lo tanto, es prioritario realizar una adecuada filtración de todo dato que esté relacionado con los ruidos y posteriormente ejecutar una clasificación empleando algoritmos automáticos, lo que se traduce en un indiscutible ahorro de tiempo. No obstante, nunca se debe omitir la revisión manual de la clasificación automática. Cuyo propósito es verificar y corregir las zonas donde exista una errónea asignación del tipo de cobertura. Aunque es un proceso un tanto dispendioso y que consume tiempo, es crucial para garantizar una buena calidad de la clasificación final y por lo tanto en la elaboración de sus dos derivados principales, como son el DTM y DSM.

### **7.3.2. DETECCIÓN DE VIVIENDAS, AREA ARBUSTIVAS E INDIVIDUALIZACIÓN DE ARBOLES MAYORES A 3 METROS.**

El siguiente subcapítulo se explica la metodología empleada para la extracción de información de los insumos y derivados correspondientes a la Nube de Puntos LiDAR y la ortofotografía. Para este proceso, se debe tomar en cuenta que tipo de cobertura se desea analizar, cuales son las características que mejor se pueden identificar de cada una de ellas y como se puede generar los algoritmos de forma apropiada.

En el alcance del proyecto se desea identificar tres tipos de cobertura:

- identificar y clasificar las edificaciones.
- identificar y clasificar áreas de vegetación mayores a tres metros, separadas en grupos de 3, 5, 10 y mayores de 15 metros.
- identificar y clasificar los arboles de forma individual.

Para completar con éxito el proceso de la generación de algoritmos. Se usará el software comercial ecognition de Trimble ([Trimble, 2012](#)).

#### **7.3.2.1. DETECCIÓN DE EDIFICACIONES.**

Uno de los impactos a considerar dentro de un trazado de gasoducto es el de tipo ambiental. Durante la etapa de construcción, indudablemente se genera una transformación del entorno de la zona del proyecto debido a la intervención humana. Como propósito responsable, se desea minimizar este tipo impactos, evitando zonas de especial vulnerabilidad bajo criterios mínimos de diseño. No obstante, para plantear un diseño viable es necesario contar con cartografía que represente de forma muy cercana la mayor cantidad de información de interés sobre el terreno.

Una de las capas destacables que hace parte de la cartografía, es conocer las coberturas de zonas de vegetación con alturas mayores a tres metros y la cantidad de árboles para propósitos de estudios de inventario forestal. Como bien se sabe, se cuenta con unos insumos, por lo que se recomienda inicialmente analizar sus rasgos característicos. Para el presente estudio, se cuenta con información vectorial LiDAR con densidad de 4ptos/m<sup>2</sup> y una imagen Aérea con tres bandas en el visible. Ahora bien, como el interés es conocer la vegetación, existen unas características inherentes a cada imagen asociadas a esta cobertura y que también se debe analizar en sus propiedades particulares para que contribuya en las ideas para proponer los algoritmos adecuados (Navulur, 2007; Trimble, 2012).

Las características de la información LiDAR, imagen aérea y las coberturas se relacionan en la siguiente tabla.

Tabla 2. Rasgos característicos de la vegetación para la información LiDAR y la imagen.

<b>Información Vectorial LiDAR</b>	<b>Imagen aérea</b>
Densidad de 4 ptos/m <sup>2</sup>	Resolución espacial de 10cm
4 retornos en la intensidad del pulso	Bandas RGB
<b>Características para la vegetación</b>	
La vegetación tiene menos intensidad que otras coberturas como el suelo desnudo. Viviendas y pavimento.	La mayor información espectral se encuentra en la banda del verde.
Los retornos se distribuyen espacialmente a medida que va pasando la capa de la vegetación donde hasta llegar al suelo.	La vegetación presenta menos brillo que otras coberturas como suelo desnudo, viviendas y pavimento.
El primer pulso se encuentra en la parte más alta de la vegetación y el último en la más baja.	Aplicación de índices que realcen los rasgos en la banda del verde.

Fuente: Elaboración propia, 2016.

Adicionando a las características mostradas en la tabla anterior, es necesario conocer las alturas reales de la vegetación. Por lo tanto, se debe generar la capa

de modelo de elevación normalizado nDSM para percatarse de los niveles sobre el suelo.

Tomando como línea base estos rasgos, se plantea el algoritmo en ecognition de la siguiente forma:

Inicialmente se debe generar el modelo de elevación normalizado o nDSM ([Gopalakrishnan et al., 2015](#)). Repasando las particularidades de la imagen LiDAR, se conoce que el primer retorno contiene la información correspondiente a la copa de los árboles. Es decir, la máxima altura. Mientras que el último retorno generalmente corresponde al suelo. Una forma de hacerlo es generar el DSM y DTM por medio de método por interpolación bilineal para luego hacer una sustracción por resta ó la otra manera es generar una grilla por segmentación de tipo de tablero de ajedrez sobre la nube de puntos para que identifique las alturas medias por pixel de acuerdo a una resolución espacial<sup>4</sup> y empleando operadores matemáticos, se realiza la restar de la imagen del primer retorno con la imagen del último retorno, por lo que da como resultado una imagen de las alturas relativas con respecto al suelo de la vegetación o nDSM ([Suárez et al., 2004](#); [Trimble, 2012](#)). Éste método es útil para separar la vegetación de todo lo demás, con la ventaja de que se anulan las edificaciones debido a que la altura de los retornos primero y último es la misma. Con excepción de algunos reductos correspondientes al contorno por lo que se vería en la imagen un leve borde sobre la ubicación de la vivienda. Este proceso reflejaría los mismos resultados en las líneas eléctricas, permitiendo detectar los cables más fácilmente.

---

<sup>4</sup> En ecognition la grilla (segmentación tipo de ajedrez) se dimensiona de acuerdo a la dimensión de pixel de salida. Por ejemplo: si de la nube de puntos queremos generar una imagen con resolución de un metro por pixel, se indica que la grilla sea de tamaño de 1x1 metro.

La generación de la imagen nDSM se realizó a una resolución de 2 metros por pixel por medio de grilla debido a la limitante de recurso computacional y agilizar el procesamiento. Ver imagen.

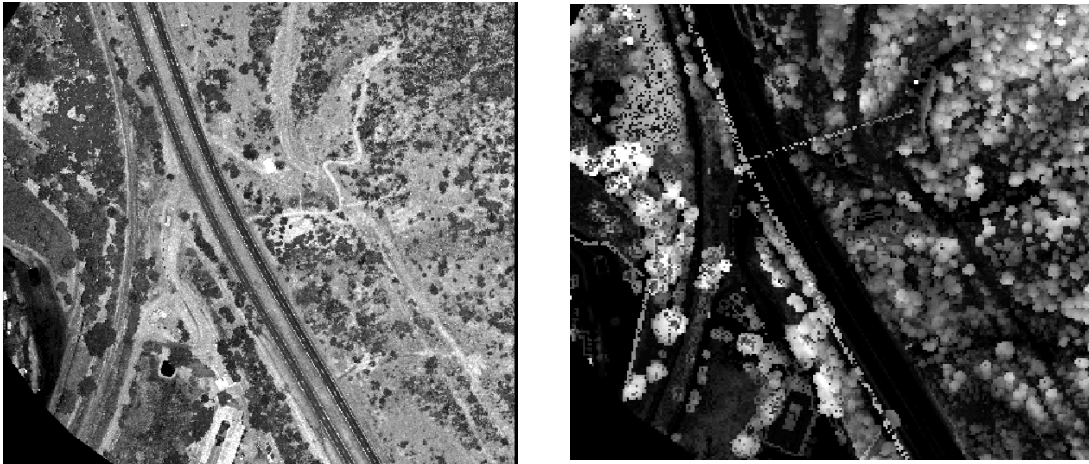


Figura 27. Imagen de intensidad LiDAR (Der.) Imagen nDSM con resolución espacial de 2 metros (Izq.). El blanco representa las mayores alturas de los elementos, en este caso se puede observar la vegetación y algunas líneas eléctricas. Fuente: Elaboración propia, 2016.

Como se puede observar en las imágenes anteriores, el nDSM es el primer insumo que ayudara en la obtención de las alturas reales de la vegetación. El propósito es que esta información se use en combinación con la imagen RGB porque se empleará técnicas de segmentación más adelante para individualización de árboles. El problema radica en que el nDSM tiene una resolución de 2 metros, mientras que la ortofoto es de 10 cm. Por lo tanto, debe aplicarse filtro de paso bajo que permite reducir el efecto de sal y pimienta sobre la imagen nDSM, además emplear una convolución por medio de kernel con tamaño X, Y que permita llevar la misma imagen a una resolución de 10 cm. Para el presente estudio, se aplicó un filtro de convolución tipo Gauss blur, El cual consiste en simular una distribución Gaussiana, “El valor máximo aparece en el pixel central y disminuye hacia los extremos, esta disminución es más rápida cuanto menor sea el parámetro de desviación típica. El resultado será un conjunto de valores entre 0 y 1. Para transformar la matriz a una matriz de números enteros se divide toda la matriz por el menor de los valores

obtenidos” (Universidad de Murcia, 2010; Trimble, 2012). Como resultado se obtiene el efecto que se conoce como Blur o difuminado en escala de grises.

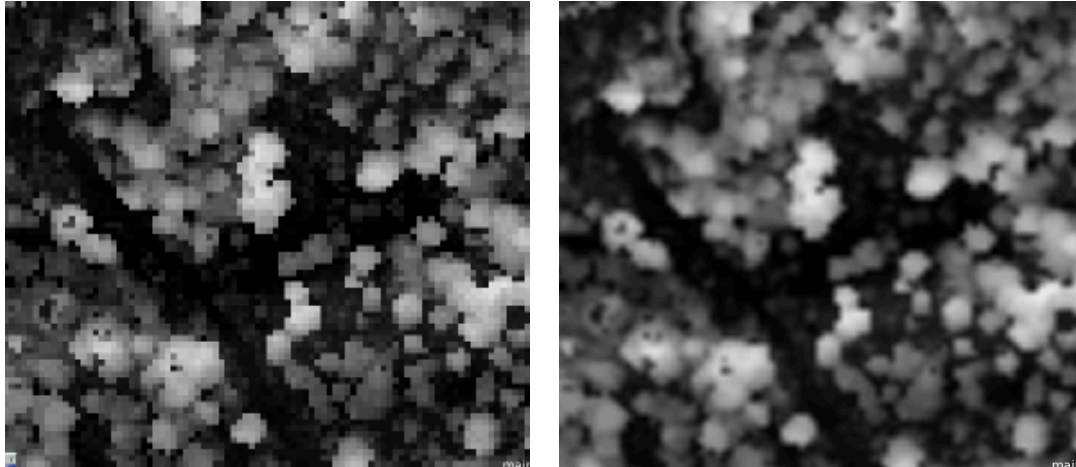


Figura 28. Imagen nDSM con resolución de 2 metros (Der.). Imagen nDSM depuesde aplicar un filtro de convolución tipo Gauss (Der.). Fuente: Elaboración propia, 2016.

Como se puede apreciar en la figura, el suavizado de la imagen de la derecha es notable en una resolución de 10 cm.

Con este paso concluido, ya puede contar con una imagen nDSM suavizada a 10cm por pixel. Sin embargo, es necesario extraer una imagen que realce los bordes para facilitar la segmentación de los objetos. Se recuerda que parte del proceso es aplicar métodos de clasificación por objetos, para ello se debe ejecutar una segmentación adecuada de la imagen y para lograr esto, es conveniente contar con una imagen que defina bien los bordes. Para cumplir con dicho proceso, se ejecutó sobre la ortofoto un filtro de paso alto de extracción de bordes por Canny's. El algoritmo expresa el hecho de “evitar la eliminación de bordes importantes y no suministrar falsos bordes, estableciendo que la distancia entre la posición real y la localizada del borde se debe minimizar y que integre las respuestas múltiples correspondientes a un único borde. Se resume en el cálculo de la magnitud y orientación del vector gradiente en cada pixel para reducir el ancho de los bordes adquiridos, hasta de un

pixel para finalmente aplicar una función de histéresis basada en dos umbrales para reducir la posibilidad de contornos falsos” [Chuvieco, \(1996\)](#) ver imagen.

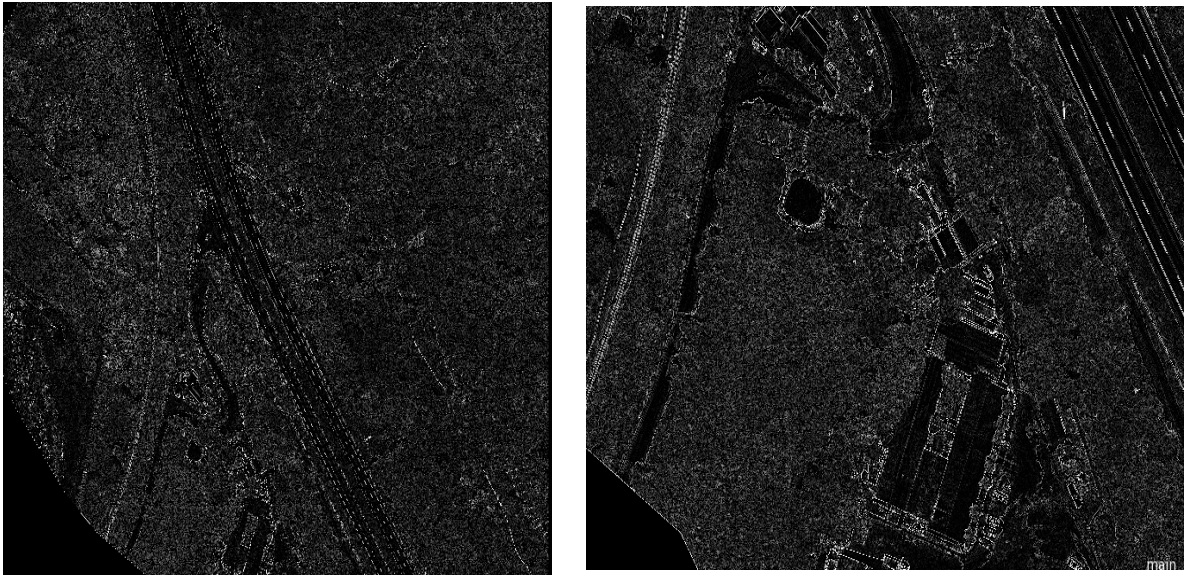


Figura 29. Imagen con filtro de paso alto Canny's (izq.) zoom de la misma imagen, se puede observar un realce en los bordes de las edificaciones (Der.).Fuente: Elaboración propia, 2016.

Como se pueden apreciar en las imágenes, es posible hacer una clara distinción de los bordes, especialmente para las edificaciones, esto quiere decir que esta nueva información es muy útil a la hora de aplicar las técnicas de segmentación, y delimitar de una forma más eficiente estos objetos de los demás como vegetación, carreteras, vías férreas, etc.

El nivel más básico de información que contiene una imagen raster se le denomina capa o banda, y todas las imágenes contienen al menos una. Una imagen a escala de grises es un ejemplo de una imagen con una banda. Mientras que las más comunes contienen tres bandas en tres longitudes de onda dentro del espectro visible y las cuales al combinarlas, conforman una imagen a color. En adición, también existen otras con diferentes longitudes de ondas como el infrarrojo (ya sea cercano, medio o lejano) y cuya capturan de información es vital para ciertas áreas



del conocimiento como el ambiental. Pues bien, una imagen puede “cortarse” en pequeños pedazos para luego formar bloques tomando como referencia estas bandas para un mejor análisis y su posterior clasificación, a esto se le llama segmentación (Trimble, 2012). Y en la actualidad existen muchos tipos de algoritmos. Algunos son: segmentación de tipo tablero de ajedrez, el cual consiste en dividir el dominio de la imagen en secciones cuadráticas homogéneas. Cada cuadro contiene cierta cantidad de píxeles y sirve para remuestrear la imagen. Se recuerda que este algoritmo se empleó en el proceso de la generación del nDSM. El insumo de entrada fue la nube de puntos del LiDAR con densidad de 4 puntos/m<sup>2</sup>, posteriormente se definió una celda de 2 x 2 para generar una imagen raster de resolución espacial de 2 metros.

La segmentación por multiresolución “disminuye el promedio de heterogeneidad de los objetos de la imagen para una resolución dada y maximiza la homogeneidad de los objetos. El algoritmo tiene complejidades matemáticas y que se puede resumir de la siguiente forma: El procedimiento inicia con objetos de imagen individuales de un píxel y repetidamente los fusiona mediante procesos iterativos a grandes unidades, así mantiene los umbrales de homogeneidad sin excederlos localmente. Este criterio de definido como la combinación de la homogeneidad espectral y la homogeneidad de forma de acuerdo a la escala que se desea trabajar” (Trimble, 2012).

Para la investigación, se mencionó que la fotografía aérea tiene una resolución espacial de 10 cm por píxel, lo que es bastante fino. Esto significa que existe una gran heterogeneidad en los valores radiométricos de la imagen en espacios muy reducidos. Por lo tanto, si quiere realizar una clasificación por píxeles, ya sea supervisada o no supervisada, los resultados no reflejarían la realidad del terreno. Lo que sería necesario hacer un refinamiento manual, por lo que consumiría una gran cantidad de tiempo y poco práctico. En este punto es donde toma relevancia la clasificación basada objetos, el cual consiste primero en segmentar la imagen y

posteriormente clasificarla, permitiendo homogeneizar los objetos de la imagen de alta resolución. Para la segmentación tipo multiresolución, se tomó en cuenta dos insumos: la imagen RGB de 10cm y la imagen de borde tipo Canny que se generó con anterioridad. Usando estas dos imágenes, se inicia la segmentación aplicando el algoritmo, definiendo previamente la asignación de un mayor peso sobre la resolución radiométrica para que a la hora de generar los objetos, exista una coherencia en la homogeneidad de los píxeles y los bordes previamente obtenidos mediante el algoritmo de Canny para una mejor delimitación de los objetos. Ver imagen.



Figura 30. Imagen segmentada de la zona de estudio, la segmentación se realizó usando la imagen aérea y la de bordes generada por Canny. Fuente: Elaboración propia, 2016.

De la imagen anterior se distingue los objetos segmentados por homogeneidad de los píxeles, la presencia de una gran cantidad de objetos en la imagen se debe a que la escala a trabajar es sobre el un conglomerado de píxeles reducido y los cuales deben ser clasificados.

Para la clasificación, se cuenta con una gran ventaja y es la clasificación previamente realizada sobre la nube de puntos LiDAR. Que recordando, se clasifico

en tres grandes grupos: suelo, vegetación, viviendas. Como el interés del estudio es identificar las zonas con vegetación. Es necesario identificar, primero que todo, las viviendas para separarlas del resto. En ecognition es posible emplear las clasificaciones tomando como línea base cada cobertura previamente clasificada sobre la información LiDAR y usarla en la segmentación. Para ello, se emplea el algoritmo sobre la nube de puntos que separa las diferentes clases y se le asigna un color sobre los segmentos, en este caso color Magenta para las viviendas.

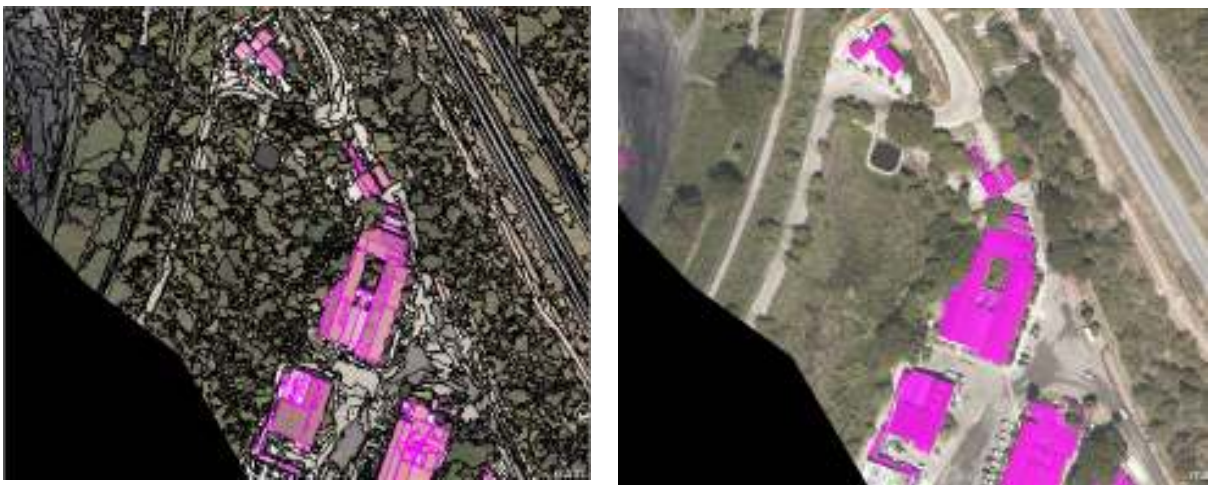


Figura 31. Imagen segmentada y con casas clasificadas (izq.). Imagen de las casas clasificadas ocultando los bordes de segmentación. (Der.) Fuente: Elaboración propia, 2016.

Un inconveniente radica en que los bordes de las viviendas no son del todo ortogonales y en ocasiones existen espacios que no fueron clasificados como viviendas de forma adecuada por lo que se pueden emplear técnicas de refinación automáticas (las cuales no son objeto de este estudio) y/o manuales.

De acuerdo con el algoritmo planteado y explicado anteriormente. Se calculó un total de 1683 unidades, Aclarando que no se tuvo en cuenta la distinción de su uso (bodegas, ranchos, fincas, entre otros). Si se hace un comparativo con la topografía tradicional sobre la misma área de estudio, este volumen de información tomaría una enorme cantidad de tiempo, (empleando una sola comisión en campo). Por lo

tanto, en vista de la necesidad de optimizar esta ejecución; se deben aumentar el número de comisiones lo que se traduciría en mayores costos lo que impactaría en el presupuesto del proyecto.

La generación de esta información, es de suma importancia en la elaboración de alternativas de los trazados de un gasoducto, ya que permite identificar la cantidad de viviendas sobre la zona de estudio lo que contribuye en la toma de decisiones con el propósito de seleccionar la mejor ruta, de tal forma, que afecte la menor porción posible de edificaciones. Contribuyendo como insumo en la cuantificación del monto aproximado en la adquisición y compra de las propiedades a indemnizar.

La detección de viviendas mediante el uso de la nube de puntos LiDAR y el ortofotomosaico, empleando metodologías de procesamiento de imágenes como técnicas de segmentación y clasificación basada en objetos, en comparación con métodos manuales de detección y generación de polígonos. Se destaca primordialmente, la reducción de los tiempos de procesamiento. La gran ventaja es contar con una clasificación previa de la nube de puntos y cuya aplicación de técnicas de segmentación y posterior clasificación por objetos tomaría solo segundos. En contraste con el método manual, que necesariamente debe realizar una inspección visual de punta a punta de la fotografía y luego dibujar los polígonos. Algo que consume demasiado tiempo. No obstante para la refinación de bordes también se tuvo que emplear en ocasiones, técnicas manuales para un mejor resultado.

### 7.3.2.2. DETECCIÓN DE AREAS DE ARBUSTIVAS MAYOR A 3 METROS DE ALTURA.

Continuando con el proceso, ya se ha avanzado en la identificación y clasificación de cobertura de viviendas. En este punto, ya se puede iniciar con la nueva etapa que corresponde a la identificación y clasificación de coberturas vegetales mayores a tres metros. Para ello se emplearon funciones de membresía (Navulur, 2007; Trimble, 2012). Esto se hizo aprovechando características de la imagen LiDAR como su altura e intensidad y generando índices de la imagen RGB, como por ejemplo, índices de vegetación para bandas dentro del espectro visible o la relación del verde.

Como se explicó con anterioridad (ver tabla 2), la vegetación media y alta presenta los menores rangos de intensidad debido a la pérdida de intensidad del láser a medida que pasa sobre el follaje, lo que facilita la distinción sobre otras coberturas. Sin embargo, en lo que respecta a intensidad, existen coberturas que también absorben la energía del pulso lo que conllevaría a que se confunda con la vegetación, por ejemplo, zonas de acopio de carbón y pavimento flexible. Aquí entra en nuevo factor y es el color. Los árboles presentan una relación alta en la banda del verde, mientras que el carbón y el pavimento es más en el azul y en el rojo respectivamente, tomando como base este criterio se puede tener una idea de la diferencia de la vegetación con el resto de coberturas en lo que se refiere a color.

Las funciones de membresía permiten “definir la relación entre los valores del objeto y el grado de membresía a cierta clase empleando operadores lógicos, los cuales son una aproximación probabilística que explota las firmas espectrales para clasificarlas a una clase dada” (Trimble, 2012). Estas funciones están contenidas en el software ecognition<sup>5</sup>.

---

<sup>5</sup> Detalles del funcionamiento de las funciones membresía ver en manual de ecognition.



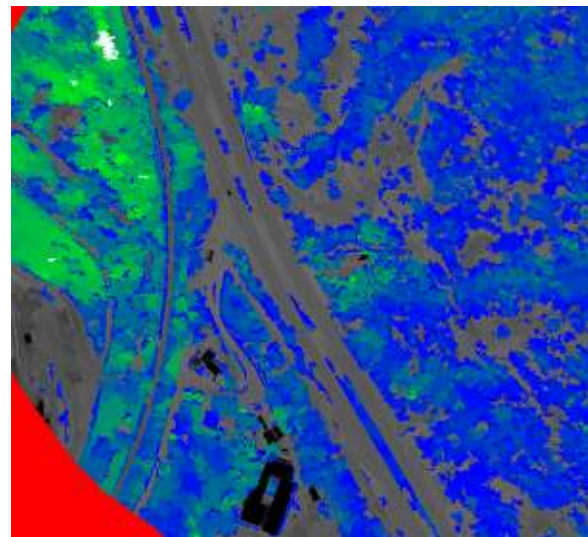
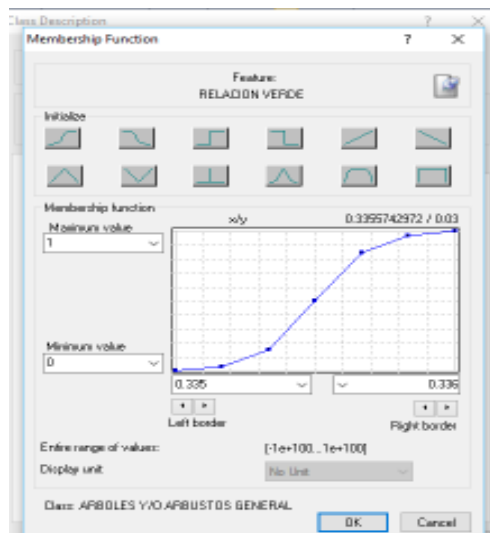
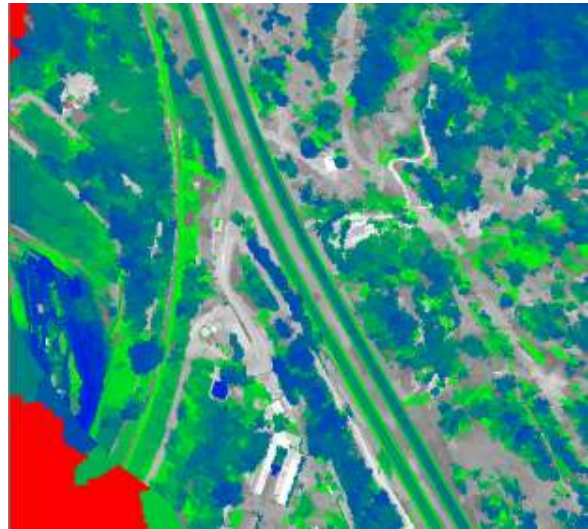
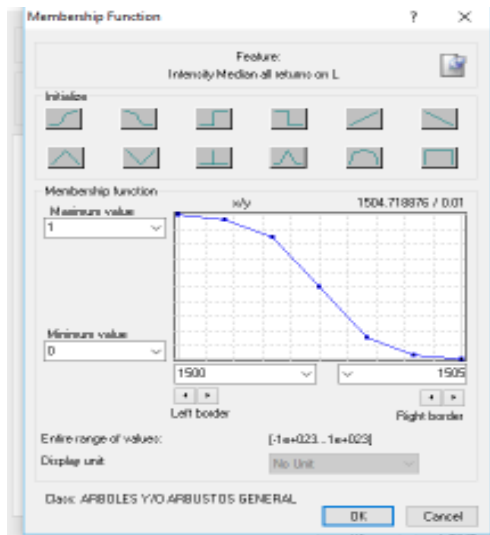


Figura 32. Función de membresía empleando operadores lógicos usando la información de intensidad del LiDAR (superior.) y relación de verde (inferior.) Resultado sobre la imagen. Azul y verde son los segmentos reconocidos por el algoritmo, gris información descartada por el algoritmo, rojo sin información. Fuente: Elaboración propia, 2016.

Como el objeto es identificar los segmentos con mayor relación de verde, se hace uso de índices espectrales, los cuales corresponden a una relación matemática de las bandas de la imagen. La ecuación del índice de vegetación para bandas dentro del espectro visible, GLI (*Green leaf index*) (Gobron et al., 2000). Es útil para resaltar

el verde cuando se tiene una imagen RGB y se usa sobre la función de membresía. La operación matemática es igual a:

$$\frac{2x_{verde} - rojo - azul}{2x_{verde} + rojo + azul}$$

En el presente caso, para la una adecuada distinción de la cobertura vegetal se empleó dos funciones de membresía correspondiente a una curva semejante a una función cúbica (ver figura 32). Observando la función, se identifica que en las abscisas se encuentran los valores de los objetos asociados al índice que se desea analizar y en las ordenadas los valores entre 0 y 1, donde cero se asigna como falso y uno como verdadero. Al configurar de forma adecuada la curva se procede a ejecutar el operador lógico que arrojará los resultados.

En este caso particular se está operando dos tipos de funciones, para la imagen de intensidad LiDAR, se seleccionó una función cubica descendente de izquierda a derecha y cuyos valores en el eje de las abscisas varían desde 1500 a 1505 (valores adimensionales). Por lo tanto, cuando se ejecuta el operador, todos los objetos con valor menor a 1503 y que estén dentro del rango de las ordenadas entre 0.7 y 1 se asignará como verdadero, es decir, se clasificará como vegetación; y los valores mayores a 1530 con rangos entre 0 y 0.7 no se tomarán en cuenta para su clasificación.

Para el índice de vegetación aplica de forma similar, se seleccionó una función cubica ascendente de izquierda a derecha y cuyos valores en el eje de las abscisas varían desde 0.335 a 0.336 (valores adimensionales). Por lo tanto, cuando se ejecuta el operador todos los objetos con valor mayor a 0.335 y que estén dentro del rango de las ordenadas entre 0.7 y 1 se asignará como verdadero, es decir, se clasificará como vegetación; y los valores menores a 0.335 con rangos entre 0 y 0.7 no se tomarán en cuenta para su clasificación.

La gran ventaja de este tipo de algoritmos radica en la gran variedad de funciones que se pueden usar de acuerdo a la cobertura a analizar, aprovechando todo tipo de imágenes e índices, aunque hay que tener buen cuidado en aplicar bien la herramienta y conocer el tipo de información con que se cuenta para no clasificar coberturas de forma errónea.

Ya una vez definidas las funciones, el software ecognition, permite ejecutar esta programación de forma simultánea, de tal forma que se obtiene el siguiente resultado:

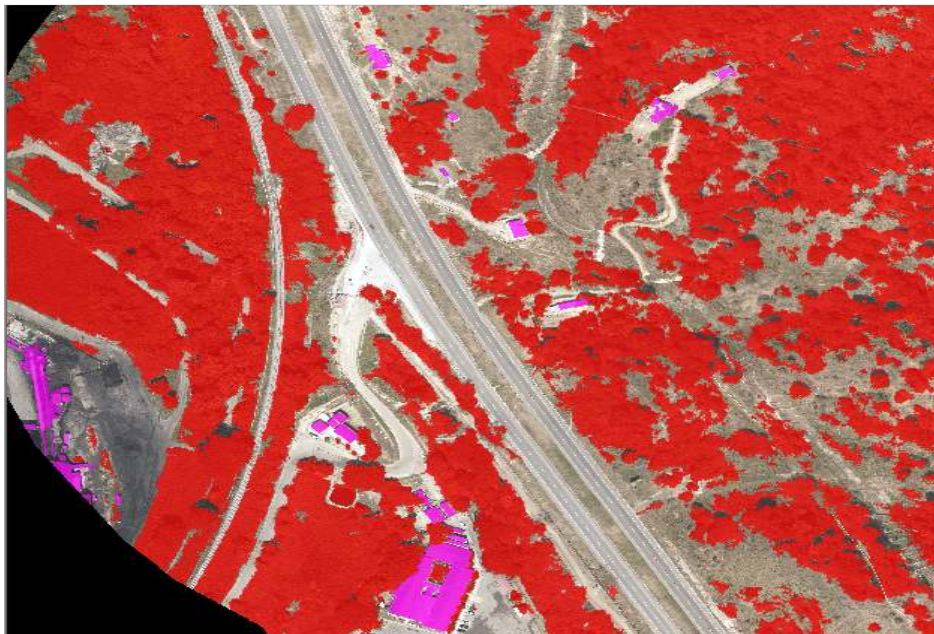


Figura 33. Imagen con vegetación Clasificada después de aplicar funciones de membresía. Fuente: Elaboración propia, 2016.

Haciendo un chequeo visual sobre el ortofotomosaico versus los resultados de la clasificación, La solución presentada es más que satisfactoria, porque clasifica la vegetación mediana y altamente densa. Lo que es importante para las necesidades del proyecto, por lo que se puede avanzar a la siguiente etapa del proceso y es la clasificación por alturas y refinación de los polígonos.



En algunas ocasiones, la imagen de intensidad LiDAR refleja pocos valores en algunos sitios puntuales de vegetación, ya sea por debilidad en el pulso, su ángulo de incidencia, o simplemente por las condiciones de la vegetación, por lo que al aplicar el algoritmo sobre el sitio, este no es reconocido como vegetación, pero su área perimetral si, en este caso, lo más apropiados es emplear un algoritmo que rellene estas áreas, lógicamente, a veces puede presentarse el relleno en un lugar totalmente ajeno a la cobertura analizada, esto no presenta problema alguno ya que puede ser descartada por valores de altura, es preciso recordar que por diferencia de los valores de altura de los pulsos, la vegetación presenta alturas, mientras que suelo y edificación no.

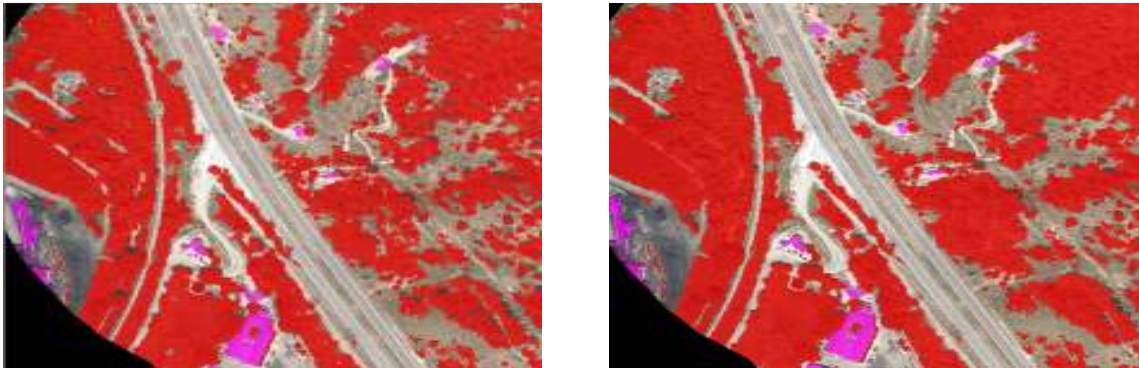


Figura 34. Imagen clasificada antes y después de relleno (izq y der.) Fuente: Elaboración propia, 2016.

El progreso en el proceso de la generación de las imágenes, ha permitido avanzar hasta la clasificación de la vegetación. Por lo que solo resta en generar el proceso para separar las alturas empleando las elevaciones del DSM normalizado ó nDSM. Se ajusta el algoritmo para que inicie seleccionado toda la cobertura que sea mayor a 3 metros, luego, de esa cobertura mayor de 3 metros que seleccione las mayores de 5 metros, después, de esa cobertura mayor de 5 metros que seleccione las mayores de 10 metros y así sucesivamente con 10 y 15 metros. Arrojando el siguiente resultado.

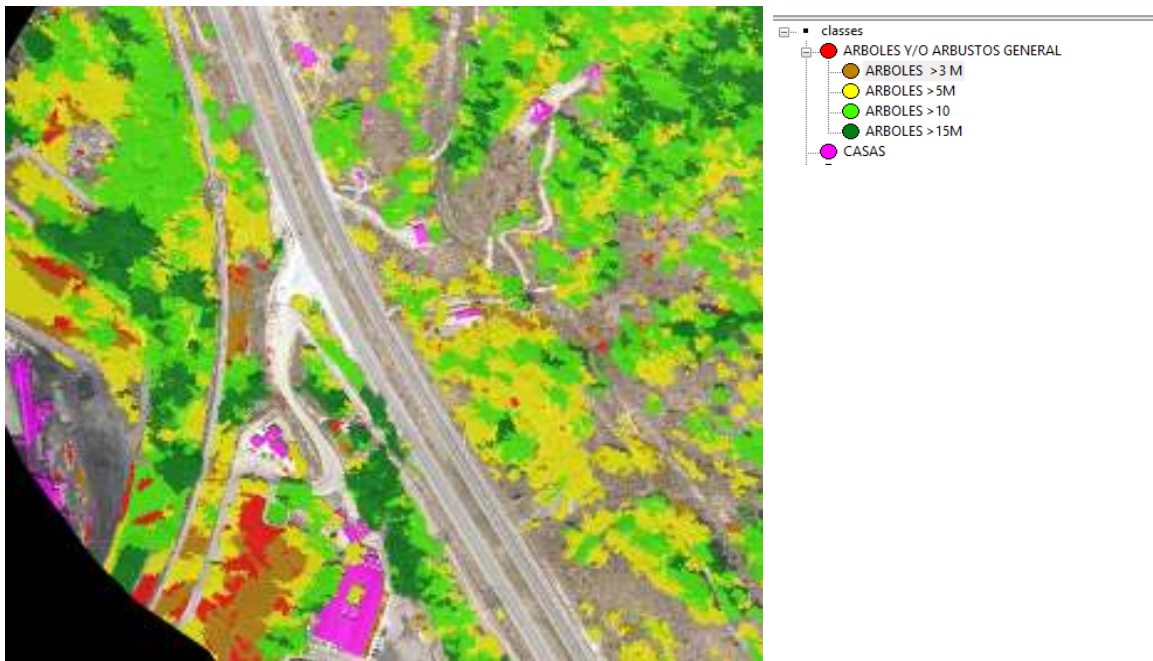


Figura 35. Imagen de coberturas clasificadas por alturas en ecognition. Fuente: Elaboración propia, 2016.

En la etapa de refinación el proceso, se enfoca más que todo en la suavización de los bordes, empleando algoritmos morfológicos de crecimiento, recorte de objetos basados en criterios de pixel y donde se relacionan los vecinos más cercanos (Definiens Developer, 2000). Esta técnica se aplica tanto a la vegetación como a las viviendas para reducir la ortogonalización ocasionados por los pixeles. “El operador morfológico puede ser abierto o cerrado. El abierto consiste en generar una imagen que contiene completamente el objeto en una máscara previamente definida, los pixeles que están fuera de ella son eliminados. Mientras que el cerrado agrega pixeles vecinos que colindan al objeto, es decir, es el área complementaria que se agrega y que contiene completamente el objeto en una máscara. La máscara es el elemento estructurado que recorre todo el objeto y puede predefinirse su forma y tamaño” (Definiens Developer, 2000).

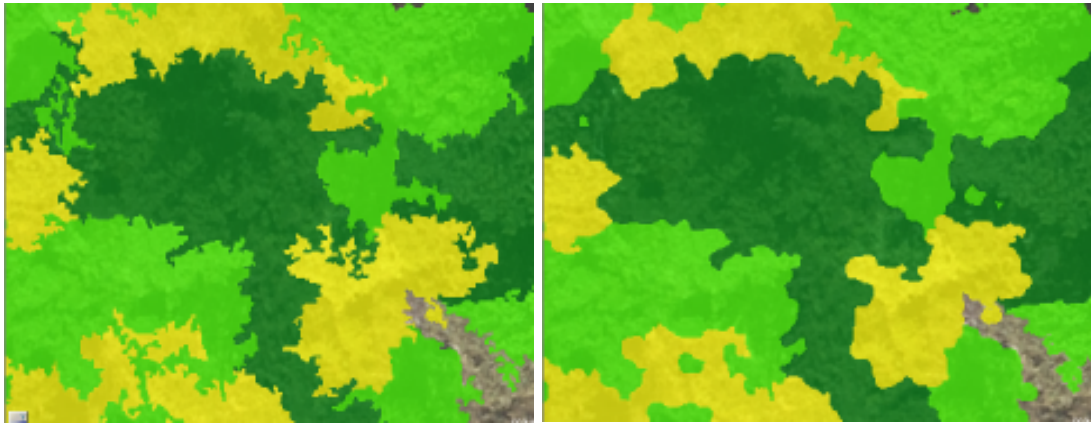


Figura 36. Comparación de suavizado de contornos en los polígonos clasificados. Fuente: Elaboración propia, 2016.

Se debe tener en cuenta que la aplicación de estos algoritmos exige un gran recurso computacional debido a la ejecución en detalle sobre toda la imagen de resolución de 10cm.

De acuerdo con los algoritmos planteados anteriormente. Se generaron coberturas para zonas de árboles mayores a 3 metros y clasificadas en 3, 5, 10 y más de 15 metros. Las áreas calculadas fueron de: 112.05 hectáreas para la cobertura de 3 a 5 metros; de 349.35 hectáreas para la cobertura de 5 a 10 metros; de 420.05 hectáreas para la cobertura de 10 a 15 metros; 294.73 hectáreas para la cobertura mayor de 15 metros. Sin exclusión de cultivos como plátano o palma africana. Por medios topográficos tradicionales, este volumen de información tomaría extraordinarias cantidades de tiempo y recursos humanos, debido a que deben estar permanentemente en campo haciendo las mediciones. Claramente la ganancia radica en el volumen de información, ahorro en tiempo y recursos humanos destinados a la misma actividad.

La generación de esta información, es de gran utilidad en la parte ambiental. Contribuye en la identificación de zonas ambientalmente sensibles junto con la fotografía aérea. Como zonas boscosas desarrolladas o zonas de arbustos

pequeños siendo esto insumo de entrada para los Estudios de Impacto Ambiental, EIA.

### **7.3.2.3. DETECCION INDIVIDUAL DE ARBOLES.**

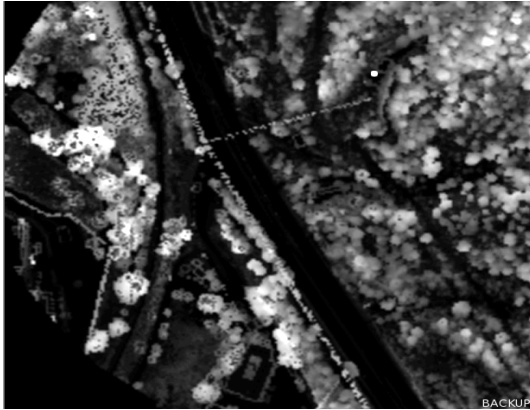
Este proceso se realizará a partir de los datos obtenidos en la detección de las áreas de árboles mayores a 3 metros. En la actualidad, existen varias técnicas para individualización de árboles en imágenes de alta resolución, uno de ellos es el 'local máxima', el cual se enfoca en el reconocimiento de los puntos más brillantes dentro sobre una ventana de búsqueda que barre toda la imagen, el algoritmo '*template matching*', que consiste en el reconocimiento de patrones y es ampliamente usado, y el '*valley-follow*' que es un método de delineación de los arboles el cual identifica las áreas sombreadas entre los árboles y hace una analogía topográfica donde los datos oscuros son los valores sobre el piso y los más brillantes los altos (Marghany, 2016).

En la presente investigación se ejecutó la técnica de 'local máxima' aprovechando la información de alturas con la que se cuenta, el algoritmo se encarga de detectar los valores de reflectancia más altos (en este caso las mayores alturas) sobre la imagen nDSM partiendo del principio que un árbol, generalmente su forma es de un domo invertido, por lo que se detectaría su copa ya que en ella se concentraría la mayor reflectancia del pulso laser y su alrededor presentaría valores más bajos.

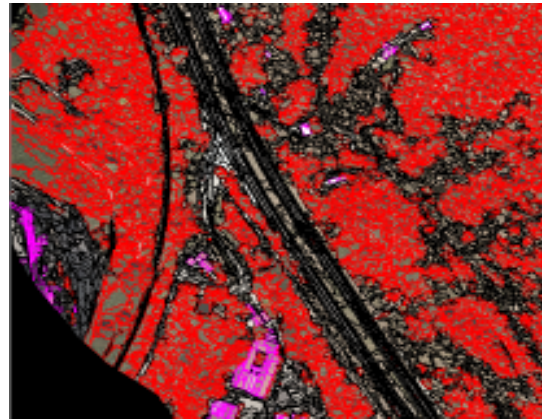
En la imagen previamente segmentada, se elaboró una nueva segmentación a un nivel más detallado, con el fin de maximizar los resultados a la hora de aplicar el 'local máxima'. Una vez localizado el polígono con mayor valor de reflectancia, es decir, el punto más alto, se calcula el centroide del mismo para una mejor visualización porque solo se necesita su posición y evitar saturación de información con áreas innecesariamente grandes.



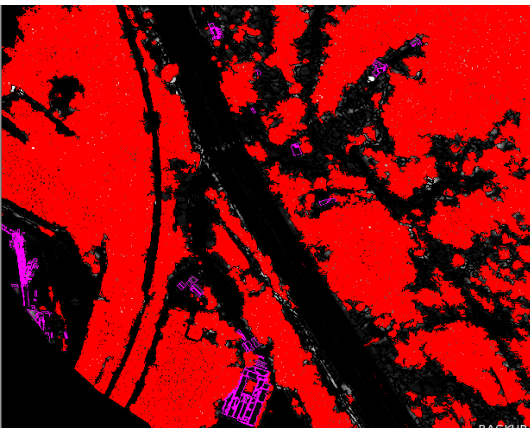
A



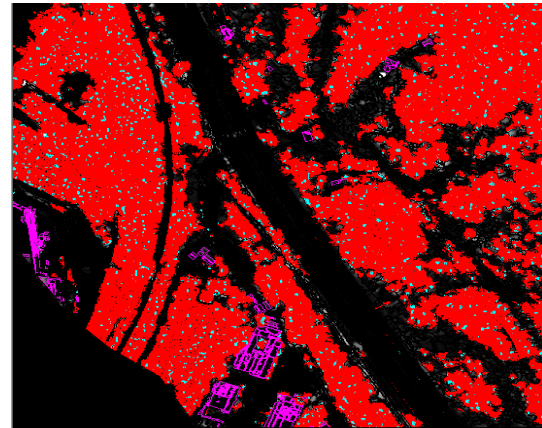
B



C



D



E.



Figura 37. (A.) nDSM suavizado. (B.) Primera segmentación. (C.) Densificación de la segmentación (D.) Resultados aplicando local máxima (E.) centroide polígonos local máxima. Fuente: Elaboración propia, 2016.

Algunas dificultades en la aplicación del local máxima ha sido en los cultivos con árboles relativamente pequeños y muy densos como el plantaciones de banano o plátano, arrojando resultados pobres en la detección individual, uno de los factores asociados es la poca resolución espacial del nDSM, (ajustado en 2m) y derivado de la necesidad de una mayor densidad en los puntos (actualmente de 4 puntos/m<sup>2</sup>). No obstante este tipo de plantaciones presenta unos patrones de forma muy similares entre sí, lo que se recomendaría aplicar la técnica del *template matching*, (el cual no fue objeto de este estudio). Adicionalmente, revisando la literatura, el local máxima arroja mejores resultados en coníferas con una confiabilidad a veces mayor al 90% pero cuando se aplica a otros tipos de árboles se reduce a un rango entre el 75% y 80% respectivamente, en este caso ,se maneja un rango de error similar. En contraste con los métodos manuales que arrojan un porcentaje de confiabilidad del 90% (Suárez et al., 2004; Tiede y Hoffman, 2006; Prieditis et al., 2012).

De acuerdo con el algoritmo planteado y explicado anteriormente para la detección de árboles individuales. Para un área de 30 km<sup>2</sup> se calculó un total de 342.768 unidades. Con un margen del 75% de precisión. En comparación con un levantamiento manual, el cual ronda en el 90% pero limitándose a áreas pequeñas, de acuerdo con la literatura consultada. Sin embargo, Lo más apropiado para aumentar estos márgenes de confianza, sería complementarlo con otras técnicas de detección como la '*template matching*', que consiste en el reconocimiento de patrones, más ideal para cultivos. Y el '*valley-follow*' que es un método de delineación de los arboles el cual identifica las áreas sombreadas entre los árboles. La ventaja comparado con técnicas manuales es su enorme capacidad de detección en masa de los arboles pero su limitante radica en la geolocalización del tronco ya que el algoritmo ubica el punto más alto del árbol, el cual no necesariamente se ubica sobre este. Así como su densidad de puntos los cuales brindan información de la forma del objeto observado.

Esta información es de vital importancia para efectos medio ambientales, permitiendo calcular de forma aproximada, el aprovechamiento forestal cuando se determine el ancho del corredor del gasoducto en las diferentes alternativas y seleccionar cuál es la que presenta menor afectación. Además de ser insumo para finalidad de Estudio de Impacto Ambiental, EIA.

La clasificación de segmentación por objetos, es una excelente técnica para imágenes aéreas de alta resolución debido a la alta heterogeneidad en los píxeles por la resolución espacial fina y que en combinación con otras imágenes como el LiDAR, facilita la identificación de ciertos elementos. Sin embargo, es necesario por parte del usuario, conocer las características de las bandas asociadas a la cobertura, de tal forma que permita proponer el algoritmo aprovechando el empleo de índices espectrales y técnicas de funciones de membresía para identificación y clasificación. Los productos obtenidos, son información cartográfica de gran utilidad para proyectos de infraestructura. No obstante, en lo concerniente a la variable de alturas y su aplicación en una adecuada segmentación individual es necesario contar con una buena densidad de puntos de la imagen LiDAR, la cual permite representar mucho mejor la forma del elemento.

#### **7.3.2.4. RESULTADOS Y CONCLUSIONES**

Empleando métodos de procesamiento sobre las imágenes, se detectó un total de 1683 unidades de Edificaciones durante un periodo de ejecución de 10 días (el algoritmo calculaba de forma simultánea las viviendas, zonas mayores a tres metros e individualización de árboles). Aclarando que no se tuvo en cuenta la distinción de su uso (bodegas, ranchos, fincas, entre otros). Si se hace un comparativo con la topografía tradicional sobre la misma área de estudio, este volumen de información tomaría una mayor cantidad de tiempo. Empleando una sola comisión en campo, generalmente el rendimiento es de 40 casas/día, debido a las grandes distancias que se deben recorrer desde una población a otra, lo que daría unos 52 días de ejecución. Por lo tanto, en vista de la necesidad de optimizar esta ejecución; se deben aumentar el número de comisiones lo que se traduciría en mayores costos, impactando en el presupuesto del proyecto.

La generación de esta información es de suma importancia en la elaboración de alternativas de los trazados de un gasoducto, ya que permite identificar la cantidad de viviendas sobre la zona de estudio, lo que contribuye en la toma de decisiones con el propósito de seleccionar la mejor ruta, de tal forma, que afecte la menor porción posible de edificaciones. Contribuyendo como insumo en la cuantificación del monto aproximado en la adquisición y compra de las propiedades a indemnizar.

Se generaron coberturas para zonas de árboles mayores a 3 metros y clasificadas en 3, 5, 10 y más de 15 metros. Las áreas calculadas fueron de: 112.05 hectáreas para la cobertura de 3 a 5 metros; de 349.35 hectáreas para la cobertura de 5 a 10 metros; de 420.05 hectáreas para la cobertura de 10 a 15 metros; 294.73 hectáreas para la cobertura mayor de 15 metros. Sin exclusión de cultivos como plátano o palma africana. Por medios topográficos tradicionales, este volumen de información no se levanta por la complejidad en su aplicación, lo que tomaría extraordinarias cantidades de tiempo y recursos humanos, debido a que deben estar



permanentemente en campo haciendo las mediciones. Claramente la ganancia radica en la posibilidad de realizar dicha actividad, como nuevo paradigma en el tipo de información obtenida.

La generación de esta información, es de gran utilidad en la parte ambiental. Contribuye en la identificación de zonas ambientalmente sensibles junto con la fotografía aérea. Como zonas boscosas desarrolladas o zonas de arbustos pequeños siendo esto insumo de entrada para los Estudios de Impacto Ambiental EIA.

Para un área de 30 km<sup>2</sup> se calculó un total de 342.768 unidades de árboles. Con un margen del 75% de precisión. En comparación con un levantamiento manual, este ronda en el 90% pero limitándose a áreas pequeñas, de acuerdo con la literatura consultada. Sin embargo, Lo más apropiado para aumentar estos márgenes de confianza, sería complementarlo con otras técnicas de detección como la '*template matching*', que consiste en el reconocimiento de patrones, más ideal para cultivos. Y el '*valley-follow*' que es un método de delineación de los arboles el cual identifica las áreas sombreadas entre los árboles. La ventaja comparada con técnicas manuales apoyada con topografía tradicional es su enorme capacidad de detección en masa de los árboles. Mientras que por métodos tradicionales el rendimiento en un conteo es de 2 a 3 hectárea/día aproximadamente en bosque natural, por métodos de procesamiento se detectó 300 hectáreas/día. Es decir, el volumen de información y el ahorro en tiempo obtenido es mayor en casi 100 veces. Pero su limitante radica en la geolocalización del tronco ya que el algoritmo ubica el punto más alto del árbol, el cual no necesariamente se ubica sobre este.

Esta información es de vital importancia para efectos medio ambientales, permitiendo calcular de forma aproximada, el aprovechamiento forestal cuando se determine el ancho del corredor del gasoducto en las diferentes alternativas y

seleccionar cuál es la que presenta menor afectación. Además de ser insumo para finalidad de Estudio de Impacto Ambiental, EIA.

### 7.3.5. GEOLOGIA Y GEOMORFOLOGIA

Para todo proyecto de infraestructura es fundamental conocer el terreno y los riesgos asociados a él. Para ello, se deben calcular diferentes índices como las pendientes del terreno, aspecto de la dirección del terreno, curvatura que mide la forma de terrenos cóncavos y convexos, drenajes y curvas de nivel, cuya representación de polilíneas define la topografía de la zona. Todo esto extraído de la información LiDAR o sus derivados como el DTM.

Para la identificación de las características geomorfológicas se aplicó la metodología RRIM (*Red Relief Image Map*) sugerido por Chiba ([Chen et al., 2015](#)). Y el cual tiene como principal insumo la imagen digital de terreno totalmente filtrada sin vegetación, edificios, líneas eléctricas, entre otros. Lo que comúnmente se conoce como DTM.

Generalmente el estudio de las geoformas de una zona de interés, se hace tomando como insumo un DTM debidamente filtrado y posteriormente se aplica un algoritmo tipo *hillshade* el cual simula el ángulo y posición del sol, dando como resultado una imagen que refleja de forma muy aproximada las formas del terreno; algo que no se alcanza a percibir en un DTM común porque no existe la percepción de profundidad, (la cual es una concepción importante para que el cerebro identifique que geoformas están por encima o cuales están por debajo). La desventaja de esta técnica radica en que la apariencia de las geoformas cambia radicalmente dependiendo de cómo se ubique la fuente de emisión, es decir, el sol. Es tal el cambio, que algunas geoformas se ven en alto relieve en una posición y ángulo “X”, pero al cambiarlas a la posición y ángulo “Y”, la misma geoforma se ve ahora en bajo relieve, por lo que se pierde la capacidad de distinguir lo que es convexo y lo que es cóncavo, generando peligrosas confusiones en el cerebro y que conlleva a graves problemas de interpretación a la hora de plasmarlos en un plano. Tal que al corroborar la información en salidas de campo, no coincidirá lo que se tiene en papel

con la realidad, siendo un error con graves implicaciones en la planificación de proyectos de infraestructura, además de graves consecuencias económicas. Adicionalmente, cuando se genera la imágenes tipo *hillshade*, si se fija en la incidencia del ángulo del sol especialmente en zonas de montaña ya sean grandes o pequeñas se perderá información de importancia por culpa de las sombras, lo que se traduce en sitios sin información y por lo tanto es necesario emplear más tiempo generando nuevas imágenes y cubrir toda el área para su interpretación hasta completar el proceso.

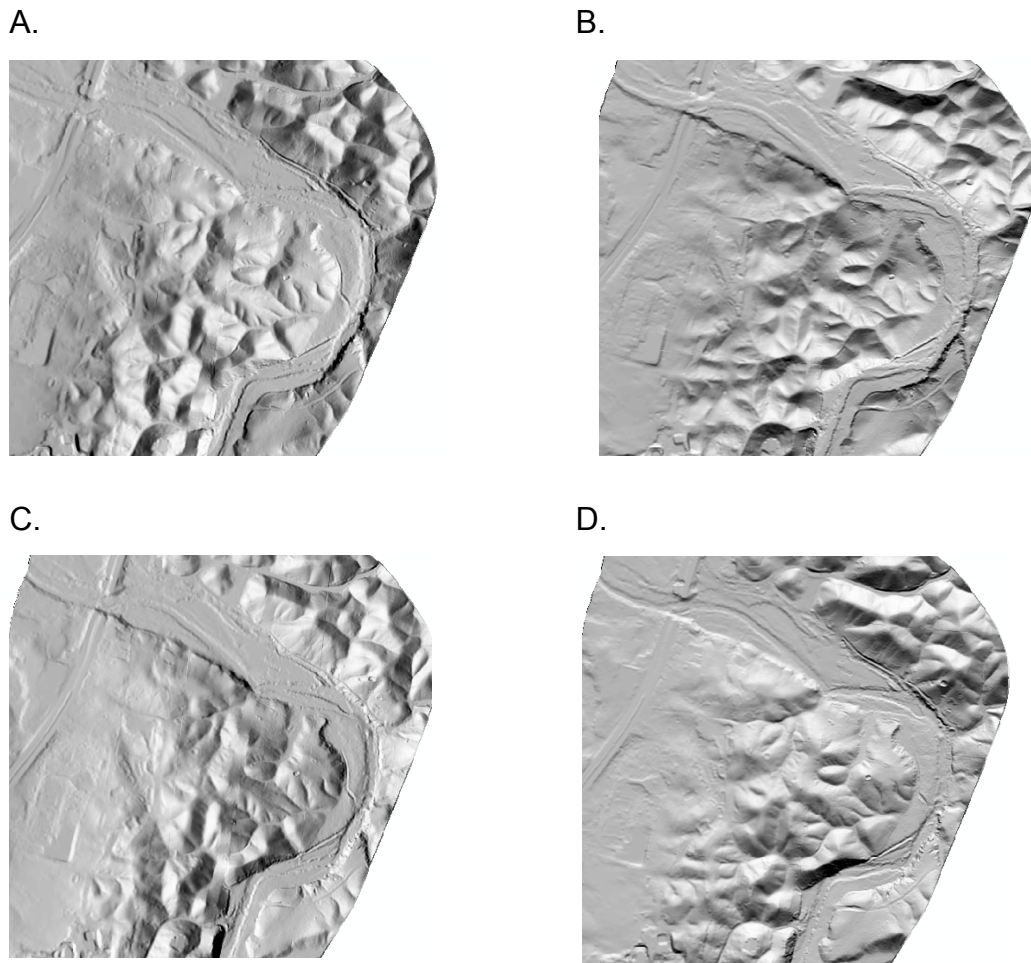


Figura 38. Las imágenes con posición a 90° pero cambiando su posición A. 90°. B. 180°. C. 270°. D.360°. Se puede observar cómo cambia la percepción de relieve en la zona. Fuente. Elaboración propia, 2016.

La metodología RRIM (*Red Relief Image Map*) toma la técnica de amplitud, la cual expresa el grado de dominancia o de encerramiento de una locación en una superficie irregular y calcula la medida angular entre la superficie del relieve y su distancia horizontal. Usa la distancia horizontal y la elevación relacionada al ángulo para calcular la pendiente sobre un terreno irregular en diferentes posiciones. Y sus resultados pueden ser usados para identificar características topográficas del área. El método calcula el zenith y el ángulo nadir en locaciones igualmente distribuidas en ocho ángulos de azimuth  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $135^\circ$ ,  $180^\circ$ ,  $225^\circ$ ,  $270^\circ$ , and  $315^\circ$  desde la línea de vista del terreno.

El método extrae información del relieve que describe concavidad y otro que describe convexidad (positivo y negativo) posteriormente se aplica la multiplicación de las capas más la diferencia de estas para ser finalmente multiplicada por 0.5. Como resultado, se obtiene una imagen del terreno que realza los rasgos sin las molestas sombras del *hillshade* que ocultan información.

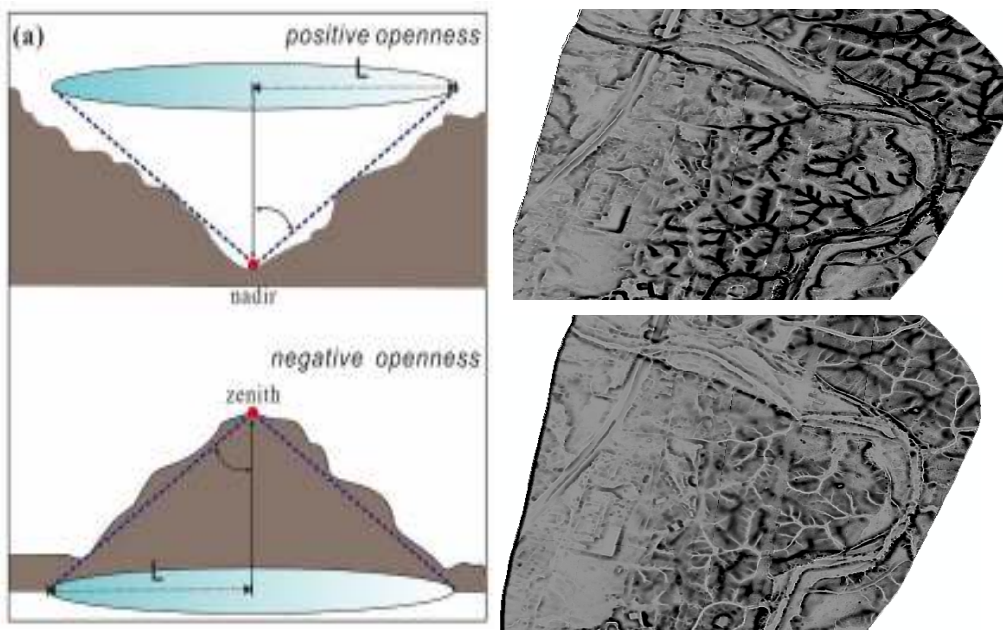


Figura 39. Imagen de amplitud abierta y cerrada (izq.) Imagen de amplitud abierta (der. sup.) y cerrada (der. inf.). Fuente: Chen, Lin, Chen, He, y Fei, 2015 y Elaboración propia, 2016.

Realizando el proceso completo y aplicando técnicas de realce se puede hacer un comparativo del DTM y el RRIM que se refleja en la siguiente imagen:

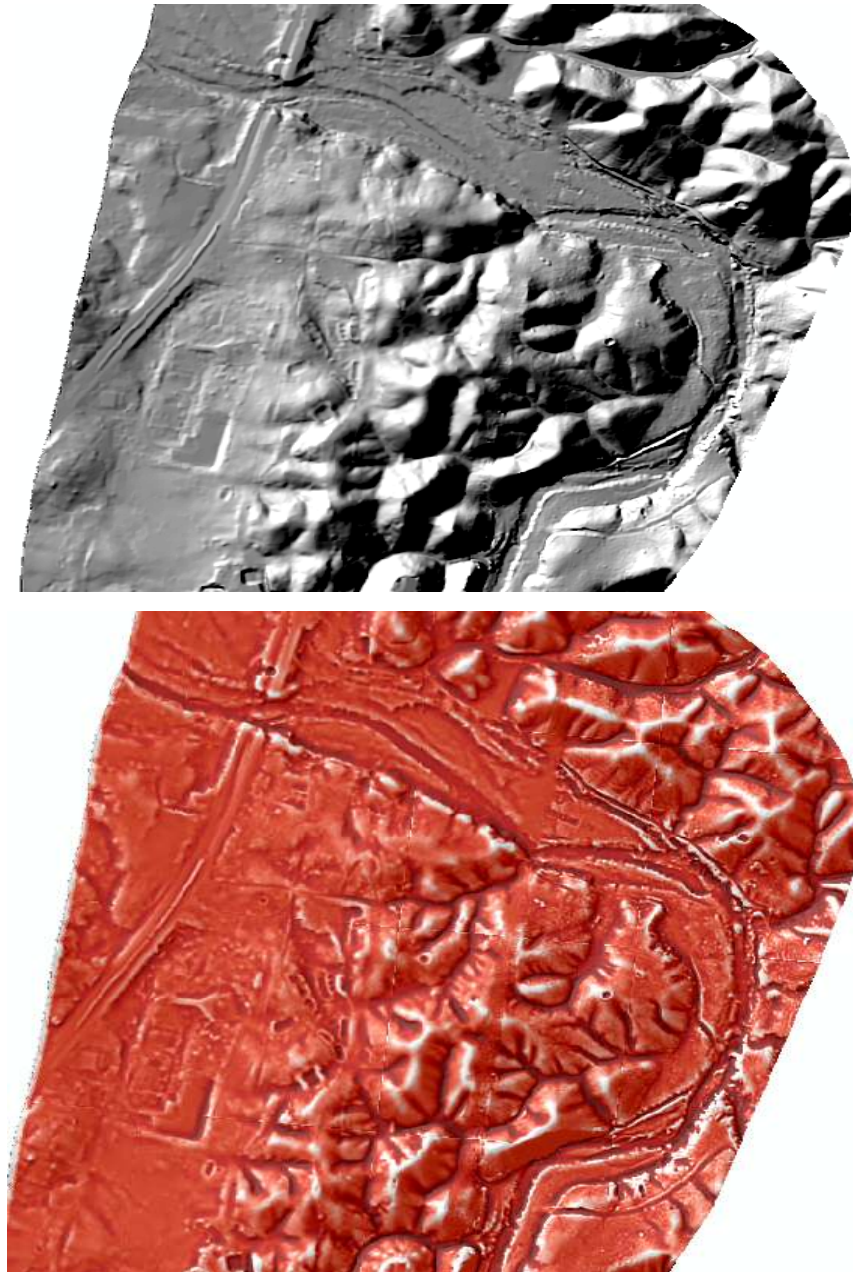


Figura 40. Imagen *Hillshade* DSM (sup.) Imagen RRIM (inf.) si se hace la comparación, desaparecieron las sombras por lo que se refleja las geoformas del terreno de forma limpia. Los valores altos están en blanco y los bajos en oscuro. Fuente: Elaboración propia, 2016.

Este será el insumo primario para la identificación de las geoformas de forma local. Igualmente se apoyará en la capa de información de líneas de drenaje calculada por algoritmos usando el DTM y la cual será explicada más adelante. Esta información se complementa muy bien con la información geológica de campo existente ya sea por Promigas o por terceros. Lo que permite ampliar la visualización y análisis de las posibles las características del terreno a estudiar. Es decir, se puede llegar a una descripción de lo local analizando la imagen RRIM usando como línea base, las descripciones de tipo regional a partir de fuentes secundarias. En comparación con los detalles del terreno que brinda una topografía convencional. Como ejemplo de esta aplicación, se emplearon los informes geológicos pertenecientes de Promigas S.A E.S.P sobre una línea existente muy cercana a la zona de interés.

#### **7.3.5.1. CARACTERISTICAS REGIONALES A PARTIR DE INFORMACIÓN SECUNDARIA**

### **HIDROGRAFIA**

Presenta un patrón de drenaje detrítico con desarrollo local a subparalelo poco espaciado, los drenajes son abundantes y lo forman las cuencas de los ríos Toribio, frío, Córdoba y Sevilla; considerados los demás afluentes como intermitentes o efímeros, están localizados en planicie de inundación donde generalmente en épocas de lluvias desbordan su cauce; desembocan sus aguas a la ciénaga grande de santa marta exceptuando el río Toribio y el Córdoba que llevan su flujo al mar Caribe; hay existencia de jagüeyes, aljibes usados para satisfacer las necesidades hídricas de la población. Fisiográficamente presenta relieves bajos a ondulados localizados en una extensa planicie de inundación



## **GEOLOGIA REGIONAL**

En el área afloran rocas del neógeno definidas por el Batolito de Santa Marta, facies de borde rocas híbridas y depósitos recientes del cuaternario como: gravas, abanicos, depósitos aluviales recientes que cubre la mayor extensión del trazado y la parte sur está constituida por depósitos de conos aluviales.

Batolito de Santa Marta. Facies de borde: Definida por [Tschanz et al., \(1969\)](#), constituida por Cuarzodioritas contaminadas por reacción con inclusiones de la roca encajante metamórfica y rocas metamórficas granitizadas metasomáticamente; comúnmente foliadas; tiene forma de halo, se distribuye como una delgada franja que sigue la forma del intrusivo.

Depósitos Cuaternarios.: Depósitos coluviales y abanicos aluviales son de poca extensión conservan la dirección NW, formados por gravas subredondeadas y bloques de roca. Depósitos aluviales formados por los principales ríos, constituidos por materiales como gravas, fragmentos de roca, ubicados a lo largo y ancho del cauce de los ríos en forma de terrazas; los principales depósitos son los de los ríos Sevilla y Frío.

## **GEOLOGIA ESTRUCTURAL REGIONAL**

Las fallas más importantes que hacen parte del área de interés son: Bucaramanga-Santa Marta y la falla Aracataca.

Falla Bucaramanga-Santa Marta: De extensión regional, con una orientación NW-SE presenta algunas variaciones en su dirección, origina un cambio marcado en la topografía, pone en contacto rocas cristalinas de la Sierra Nevada de Santa Marta con rocas más recientes y el valle fluviolacustre de la Ciénaga Grande de Santa Marta; con alto grado de buzamiento N20-35°W, de tipo inverso y componente de



rumbo sinistral; la falla es aún activa y muestra evidencias neotectónicas [Tschanz et al., \(1969\)](#).

Falla Aracataca: Estructura curvada con vergencia al NW, pone en contacto la unidad granulita de los mangos sobre los depósitos recientes de la parte plana de Sevilla, conecta a la falla de Santa Marta produciendo un gran satélite del borde de la sierra hacia el NW.

Adicional a estas estructuras el área hace parte de la región Caribe, zona de convergencia de las placas tectónicas Caribe y suramericana; siendo por lo tanto los sismos, los derrumbes, deslizamientos, hundimientos de terreno e inundaciones signos de un relieve dinámico y en formación que guarda relación con la interacción de estas grandes estructuras; generando amenazas naturales endógenas y exógenas.

## **GEOMORFOLOGIA**

Se presentan geformas de origen denudacional-agradacional identificando zonas planas con leves ondulaciones.

Las ondulaciones están constituidas por rocas híbridas, con modelado suave, desarrollo de pendientes ligeramente inclinadas a inclinadas; presencia de procesos erosivos poco desarrollados, están disectadas por drenajes permanentes e intermitentes.

Relieve plano constituye la mayor extensión del área, asociado a planicie de inundación, y está conformada por gravas, arenas, arcillas, fragmentos de roca, materiales aluviales que han sido erodados de la sierra Nevada de Santa Marta; con poca evidencia de erosión lateral y existencia de someras cárcavas.

Las Figura 37 corresponden a los ríos Toribio y Córdoba, con depósitos aluviales compuestos de material fragmentos de roca, gravas, arenas.

Las geoformas planas, cubre la mayor extensión del área, su génesis está asociada a procesos denudativos-gradacionales de origen fluvial conformados por materiales como gravas, arenas y arcillas, escasamente fragmentos de roca; localizados en zonas deprimidas que dan lugar a terrenos inundables, con abundante aporte fluviales primarios, secundarios terciarios.



Figura 41. Rio Toribío y Cordoba . Fuente: Promigas, 2014.

Se podría decir que el área de interés se encuentra dentro de la denominada planicie de inundación conformada por materiales recientes del cuaternario que comprende depósitos aluviales recientes, de gravas, conos y abanicos; con existencia hacia el norte de pequeñas ondulaciones constituidas por material híbrido de la unidad Batolito de santa marta facies de borde.

Partiendo de la revisión de información indirecta y tomando los antecedentes bibliográficos como punto de apoyo se plantea las siguientes consideraciones:

Hacia la parte norte desde el inicio hasta aproximadamente K9+400, hay predominio de ondulaciones conformadas por rocas híbridas que hacen parte del batolito de santa marta zona de borde, con desarrollo de foliación, diaclasas y posiblemente de meteorización; se tendría que establecer la tendencia del trazo con respecto a la foliación de la roca expuesta ya que dependiendo de su orientación se podrían generar o no desplazamientos de material.

El resto del trazado se trata de terrenos planos o ligeramente planos donde los materiales tienden a ser más resistentes a la erosión, sin embargo en áreas donde haya formación de terrazas representativas se tendrían que evaluar los materiales presentes (Gravas, arenas, lodolitas) para establecer sus características físicas, siendo los más erosivos los materiales finos y con base en estas se realizaría la construcción ya sea de gaviones o de postes profundos; en sitios donde haya drenajes efímeros o intermitentes se puede establecer la canalización ya que debido a que éstos flujos transportan material solo en época de lluvias las zonas tienden a ser más erosivas por la fuerza intempestiva que llevan y pueden arrastrar y desprender materiales de fondo y adyacentes.

#### **7.3.5.2. CARACTERISTICAS GEOMORFOLOGICAS LOCALES A PARTIR DE LA IMAGEN RRIM (RED RELIEF IMAGE MAP)**

Para la descripción geomorfológica a nivel local, se toma como línea base la descripción regional, siendo este de gran importancia porque da una idea acerca de la configuración del terreno sobre la zona de estudio. Un dato de interés, es el poco ancho de las imágenes de alta resolución en lo referente a la ortofoto, LiDAR y su derivados como DTM y DSM (600 metros), lo que limita la visualización de las geoformas de manera más completa. Esto no quiere decir que no se pueda hacer

una interpretación de ellas, sino que lo más recomendable es contar con amplias áreas para una adecuada interpretación.

En el presente estudio se enfoca en la identificación geomorfológica bajo criterios de interés en infraestructuras.

## **CRITERIOS DE IDENTIFICACIÓN**

Para la descripción geomorfológica se identificó las geoformas de acuerdo a su topografía, drenajes y tipo de erosión, se toma como base algunos criterios de [\(Vengoechea, 1966; Gonzales et al., 2004\)](#) el cual está resumido en la siguiente tabla:

Tabla 3. Tabla base para la clasificación geomorfológica.

TOPOGRAFIA			DRENAJE		EROSION	
Relieve	terrazza	Es una franja de tierra plana situada a lo largo de la pared del valle justamente sobre el valle de crecidas	Plano de inundación	Escurrimiento superficial y deposición de sedimentos en láminas por desborde.	Cohesivo	arcillas y suelos arcillo limosos
	colina	prominencia de terreno que no supera los 300m desde su base hasta la cima	Dendritico	generalmente se presenta en zonas con granulación fina, material homogéneo, permeabilidad relativamente baja, topografía plana o pendiente suaves, roca dura y uniforme y homogénea con resistencia uniforme a la erosión.	Semi-cohesivo	arcillas arenosas pobremente cementadas
	plano de inundación	Es una geoforma amplia y alargada de relieve plano a ligeramente plano, con pendientes bajas, siendo de amplitud variable respecto de su longitud, y estando intercalada entre dos sectores de relieves mas fuertes, teniendo como eje un curso de agua.	Rastrillo	controlado por la estructura y estratificación de las rocas plegadas inclinadas generalmente donde existen fallas paralelas.	semi-cohesivo	loes y limo aluvial
	pedemonte	El pedemonte se refiere literalmente a un tipo de paisaje situado al pie de la montaña	Radial	presente en elevaciones conicas como los volcanes o extrusiones igneas.	no-cohesivo	materiales granulares (arena y grava)
forma	delgada		Paralelo	generalmente presente en formaciones con pendientes fuertes y uniformes o con sistema de fallas paralelas y tambien en terrenos uniformemente inclinados constituido por materiales de grano grueso.		
	mediana		Anular	producidas por intrusiones igneas que han causado el levantamiento periferico de las formas sedimentarias que originalmente cubrian la zona.		
	grande		Rectangular	exclusivamente de la formación netamente rocosa asociado a fallas, fracturas y a diasclasas		
	ondulada		artificial	producto de la actividad humana para la adecuacion y proteccion de tierras.		
	quebrada		pinado	es una modificación del sistema dendritico los tributarios estan distribuidos de forma paralela		
	paralela					
	circular					
	eliptica					
pendiente	suave					
	media					
	fuerte					

Fuente Elaboración propia, 2016.

De acuerdo a [Vengoechea, \(1966\)](#) “La topografía de un terreno es función de las características físicas de los materiales que lo constituyen de la estructura geológica y de los procesos geomorfológicos que hayan ocurrido o estén operando en la región. En general se puede decir que la estructura geológica es el factor dominante en el control de la evolución de las formas terrestres y se refleja en ellas. Los procesos geomorfológicos dejan una huella característica sobre la morfología terrestre y cada proceso geomorfológico desarrolla un conjunto particular de formas terrestres”.

De los conceptos anteriores se desprende que las características externas físicas de las formaciones geológicas se reflejan necesariamente en la topografía. Esto permite decir, que si se tiene suficiente información como curvas de nivel u otra información que refleje la altimetría y planimetría se puede lograr una identificación satisfactoria de las características geomorfológicas del área de interés.

[Vengoechea, \(1966\)](#) “indica que Para el sistema de drenaje que se forma en un material es principalmente en función de la relación entre infiltración y el escurrimiento que caracteriza dicho material. La relación infiltración escurrimiento depende a su turno de las características físicas de los materiales por lo menos para un régimen climático determinado. Sin embargo, existen otras variables como el tipo y densidad de la vegetación, grado de humedad del suelo, composición mineral del suelo y rocas, así como otros efectos físicoquímicos. Sin embargo, estos efectos están sujetos como siempre superpuestos al factor primario de la composición y granulometría del suelo o de la roca y estos son los que durante periodos relativamente largos de erosión geológica ejercen un efecto dominante en el desarrollo de la esorrentía o sistema de drenaje superficial.

Finalmente la erosión es el resultado de la acción de las aguas de esorrentía sobre el suelo. Se desarrolla cuando el agua no puede infiltrarse satisfactoriamente dentro del suelo y corre sobre la superficie del terreno formando pequeños zanjones. Estos

riachuelos crecen con el tiempo y adquieren una forma particular características del material en el que corren. Por esta razón los zanjones o canales de erosión están asociados con ciertas condiciones de suelo y tipos de terreno.

Las arcillas y limos de granulación fina siendo relativamente impermeables permiten la formación de numerosos zanjones, mientras que la arena y la grava siendo muy permeables tienen pocos zanjones. Sin embargo, la densidad de zanjones nos es tan importante para determinar las características del suelo como es el factor de forma y gradiente de los zanjones”.

Generalmente un zanjón sirve para indicar las propiedades de los suelos superficiales. A medida que el zanjón se profundiza a las capas inferiores del perfil del suelo da una indicación sobre las características del material subterráneo.

Tal como se mencionó antes, se tomó como referencia las descripciones de los informes de campo provenientes ya sea de Promigas S.A E.S.P o de terceros. Además, con las descripciones previamente mencionadas sobre los indicios para las características físicas mediante la observación del tipo y forma de la erosión en los drenajes mediante interpretación del DTM con metodología RRIM. Ayuda en la descripción de la geomorfología y la cual se presenta a continuación.

## **GEOMORFOLOGÍA**

Km0+000 al km 10+000

A lo largo de la abscisa k0+000 hasta la abscisa km 10+000, se encuentran de forma intermitente geoformas de tipo colina con ondulaciones convexas paralelas que están constituidas por rocas híbridas, desarrollo de pendientes ligeramente inclinadas a inclinadas; presencia de procesos erosivos poco desarrollados, los cuales presentan zanjas con gradiente compuesto (pendiente leves y fuertes en su

perfil longitudinal, forma transversal en U con aristas circulares) lo que indica presencia de suelos de tipo semi-cohesivo con arcillas arenosas pobremente cementadas. Adicionalmente, el paisaje está disectado por drenajes permanentes e intermitentes de tipo dendrítico, donde generalmente se presenta en zonas con granulación fina, material homogéneo, permeabilidad relativamente baja, topografía plana o pendiente suaves, roca dura y uniforme y homogénea con resistencia uniforme a la erosión. También existe presencia de valles cuya geoforma es alargada de relieve plano a ligeramente plano, con pendientes bajas, siendo de amplitud variable respecto de su longitud, y estando intercalada entre dos sectores de relieves más fuertes, teniendo como eje un curso de agua, incluye área de depositación de los aportes de sedimentos, correspondiente al plano de inundación y terrazas que marcaron un área de deposición de los aportes longitudinales y de los aportes laterales de sedimentos. Presencia de pequeños abanicos con presencia de material semi-cohesivo generados por la acción de líneas de escorrentía superficiales, el abanico generalmente es una unidad del terreno formado cuando una corriente de agua que viene de un sistema montañoso fluye hacia una zona más aplanada y su velocidad disminuye, depositando sus sedimentos de manera radial pero caótica y sin arreglo o gradación granulométrica.

En la siguiente figura puede ver las diferentes imágenes extraídas de la información LiDAR adicionales al RRIM para el análisis geomorfológico.



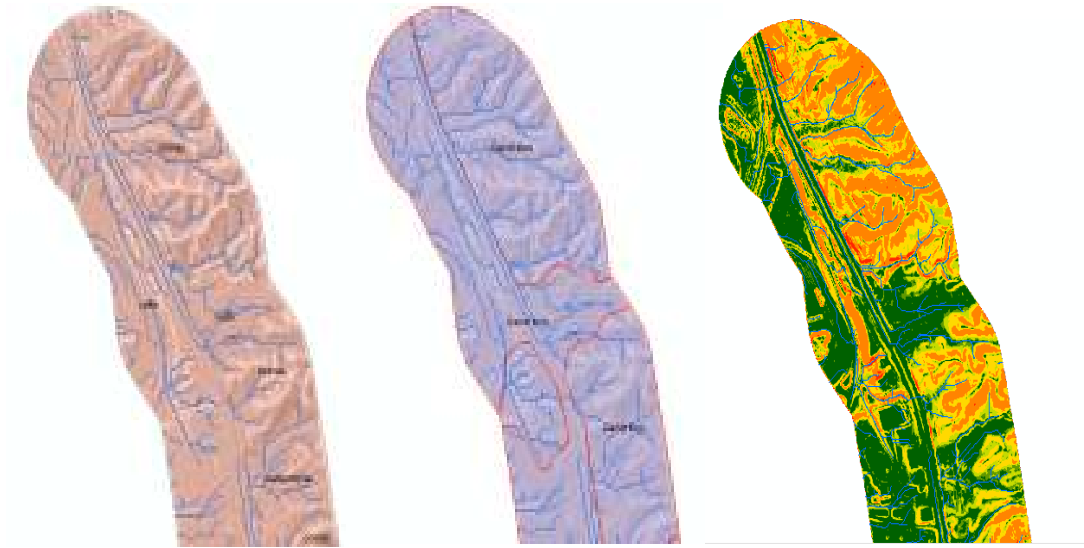


Figura 42. Imágenes de análisis del terreno. (izq.) geoformas (cent.) drenajes (der.) pendientes. Fuente: Elaboración propia, 2016.

#### Km 10+000 al km 20+000

A lo largo de la abscisa k10+000 hasta la abscisa km 20+000, el relieve plano constituye la mayor extensión del área, asociado a planicie de inundación, y está conformada por gravas, arenas, arcillas, fragmentos de roca, materiales aluviales que han sido erodados de la sierra nevada de santa marta; con evidencia de erosión lateral y existencia de someras cárcavas en algunos rios.

Las geoformas planas, cubre la mayor extensión del área, su génesis está asociada a procesos denudativos-agradacionales de origen fluvial conformados por materiales como gravas, arenas y arcillas, escasamente fragmentos de roca; localizados en zonas deprimidas que dan lugar a terrenos inundables,

Presencia de procesos erosivos poco desarrollados, los cuales presentan zanjas con gradiente uniforme (pendientes leves y fuertes en su perfil longitudinal, forma

transversal muy suave) lo que indica presencia de suelos de tipo cohesivo con arcillas y suelos limoarcillosos. Adicionalmente, el paisaje está disectado en su mayoría por drenajes artificiales, lo que es producto de la actividad humana para la adecuación y protección de tierras cultivadas para evacuación de excesos de agua donde generalmente se presenta en zonas con granulación fina, material homogéneo, permeabilidad relativamente baja, topografía plana o pendiente suaves, roca dura y uniforme y homogénea con resistencia uniforme a la erosión. También existe presencia de valles cuya geoforma es alargada de relieve plano a ligeramente plano, con pendientes bajas, siendo de amplitud variable respecto de su longitud, y estando intercalada entre dos sectores de relieves más fuertes, teniendo como eje un curso de agua, incluye área de depositación de los aportes de sedimentos, correspondiente al plano de inundación y terrazas que marcaron un área de deposición de los aportes longitudinales y de los aportes laterales de sedimentos.

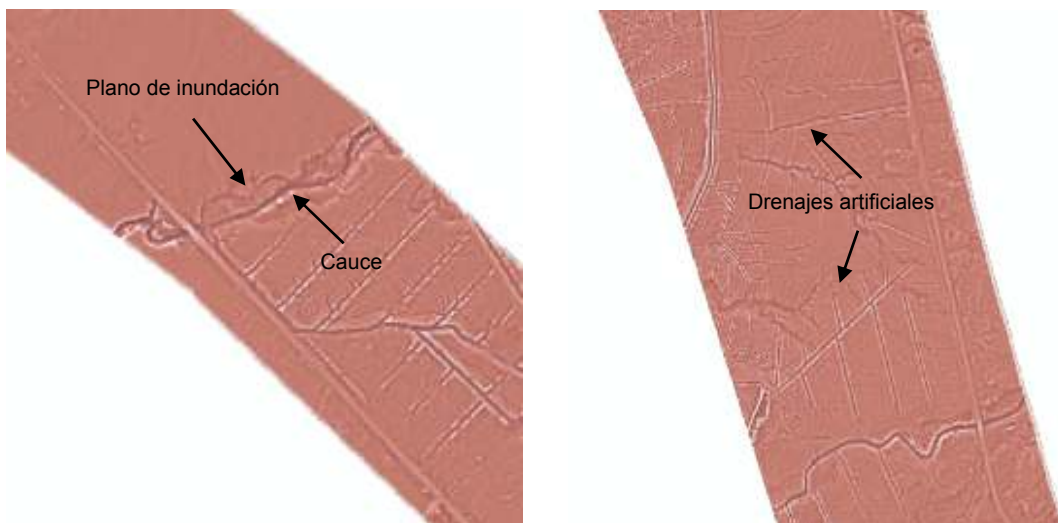


Figura 43: Visualización del terreno entre las abscisas km10+000 y km 20+000, obsérvese cauce de río con su plano de inundación y drenajes artificiales sobre la superficie. Fuente: Elaboración propia.

Km 20+000 al km 30+000

Al igual que el anterior, a lo largo de la abscisa k20+000 hasta la abscisa km 30+000, el relieve plano constituye la mayor extensión del área, asociado a planicie de inundación, y está conformada por gravas, arenas, arcillas, fragmentos de roca, materiales aluviales que han sido erodados de la sierra nevada de santa marta; con evidencia de erosión lateral y existencia de someras cárcavas en algunos ríos.

Las geoformas planas, cubre la mayor extensión del área, su génesis está asociada a procesos denudativos-agradacionales de origen fluvial conformados por materiales como gravas, arenas y arcillas, escasamente fragmentos de roca; localizados en zonas deprimidas que dan lugar a terrenos inundables,

Presencia de procesos erosivos poco desarrollados, los cuales presentan zanjas con gradiente uniforme (pendientes leves y fuertes en su perfil longitudinal, forma transversal muy suave) lo que indica presencia de suelos de tipo cohesivo con arcillas y suelos limoarcillosos. Adicionalmente, el paisaje está disectado en su mayoría por drenajes artificiales, lo que es producto de la actividad humana para la adecuación y protección de tierras cultivadas para evacuación de excesos de agua donde, igualmente existe presencia de drenajes permanentes e intermitentes de tipo dendrítico, generalmente se presenta en zonas con granulación fina, material homogéneo, permeabilidad relativamente baja, topografía plana o pendiente suaves, roca dura y uniforme y homogénea con resistencia uniforme a la erosión. También existe presencia de valles cuya geoforma es alargada de relieve plano a ligeramente plano, con pendientes bajas, siendo de amplitud variable respecto de su longitud, y estando intercalada entre dos sectores de relieves más fuertes, teniendo como eje un curso de agua, incluye área de depositación de los aportes de sedimentos, correspondiente al plano de inundación y terrazas que marcaron un

área de deposición de los aportes longitudinales y de los aportes laterales de sedimentos.

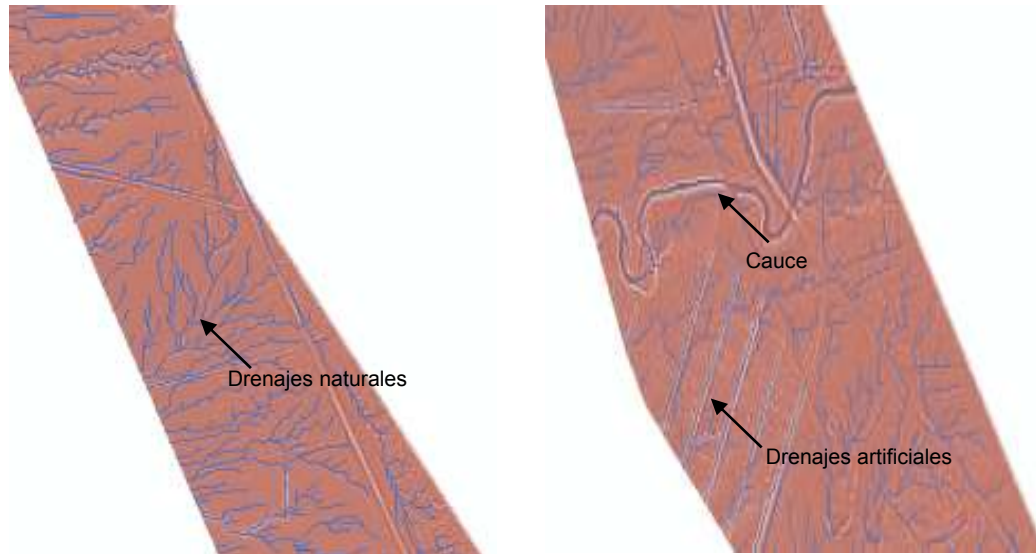


Figura 44. Visualización del terreno entre las abscisas km 20+000 y km 30+000, obsérvese cauce de río y drenajes artificiales y naturales sobre la superficie. Fuente: Elaboración propia, 2016.

#### Km 30+000 al km 40+000

Al igual que el anterior, a lo largo de la abscisa k30+000 hasta la abscisa km 40+000, el relieve plano constituye la mayor extensión del área, asociado a planicie de inundación, y está conformada por gravas, arenas, arcillas, fragmentos de roca, materiales aluviales que han sido erodados de la sierra nevada de santa marta; con evidencia de erosión lateral y existencia de someras cárcavas en algunos ríos.

Las geoformas planas, cubre la mayor extensión del área, su génesis está asociada a procesos denudativos-agradacionales de origen fluvial conformados por materiales como gravas, arenas y arcillas, escasamente fragmentos de roca; localizados en zonas deprimidas que dan lugar a terrenos inundables,

Presencia de procesos erosivos poco desarrollados, los cuales presentan zanjas con gradiente uniforme (pendientes leves y fuertes en su perfil longitudinal, forma transversal muy suave) lo que indica presencia de suelos de tipo cohesivo con arcillas y suelos limoarcillosos. Adicionalmente, el paisaje está disectado en su mayoría por drenajes artificiales, lo que es producto de la actividad humana para la adecuación y protección de tierras cultivadas para evacuación de excesos de agua donde, igualmente existe presencia de drenajes permanentes e intermitentes de tipo dendrítico, generalmente se presenta en zonas con granulación fina, material homogéneo, permeabilidad relativamente baja, topografía plana o pendiente suaves, roca dura y uniforme y homogénea con resistencia uniforme a la erosión. También existe presencia de valles cuya geoforma es alargada de relieve plano a ligeramente plano, con pendientes bajas, siendo de amplitud variable respecto de su longitud, y estando intercalada entre dos sectores de relieves más fuertes, teniendo como eje un curso de agua, incluye área de depositación de los aportes de sedimentos, correspondiente al plano de inundación y terrazas que marcaron un área de deposición de los aportes longitudinales y de los aportes laterales de sedimentos.

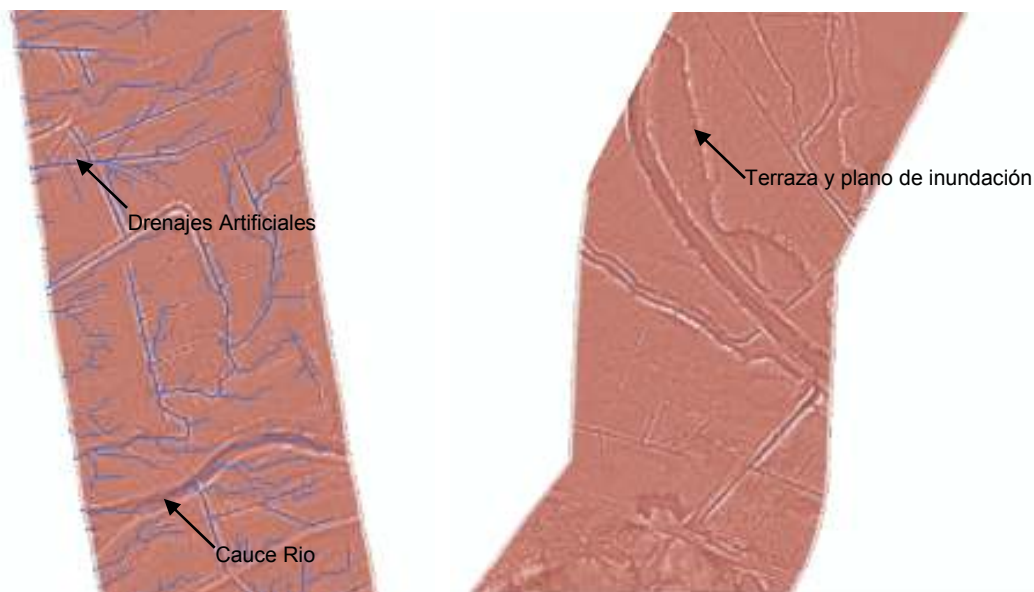


Figura 45. Visualización del terreno entre las abscisas km30+000 y km 40+000, obsérvese cauce de río con sus terrazas y plano de inundación, drenajes artificiales y naturales sobre la superficie. Fuente: Elaboración propia, 2016.

Km 40+000 al km 50+000

A lo largo de la abscisa km40+000 hasta la abscisa km 50+000, se encuentran de forma intermitente geoformas de tipo colina con ondulaciones convexas paralelas que están constituidas por rocas híbridas, desarrollo de pendientes ligeramente inclinadas a inclinadas; presencia de procesos erosivos poco desarrollados, los cuales presentan zanjas con gradiente compuesto (pendiente leves y fuertes en su perfil longitudinal, forma transversal en U con aristas circulares) lo que indica presencia de suelos de tipo semi-cohesivo con arcillas arenosas pobremente cementadas. Adicionalmente, el paisaje está disectado por drenajes permanentes e intermitentes de tipo dendrítico, donde generalmente se presenta en zonas con granulación fina, material homogéneo, permeabilidad relativamente baja, topografía plana o pendiente suaves, roca dura y uniforme y homogénea con resistencia uniforme a la erosión. También existe presencia de valles cuya geoforma es alargada de relieve plano a ligeramente plano, con pendientes bajas, siendo de amplitud variable respecto de su longitud, y estando intercalada entre dos sectores de relieves más fuertes, teniendo como eje un curso de agua, incluye área de depositación de los aportes de sedimentos, correspondiente al plano de inundación y terrazas que marcaron un área de deposición de los aportes longitudinales y de los aportes laterales de sedimentos. Presencia de pequeños abanicos con presencia de material semi-cohesivo generados por la acción de líneas de escorrentía superficiales, el abanico generalmente es una unidad del terreno formado cuando una corriente de agua que viene de un sistema montañoso fluye hacia una zona más aplanada y su velocidad disminuye, depositando sus sedimentos de manera radial pero caótica y sin arreglo o gradación granulométrica

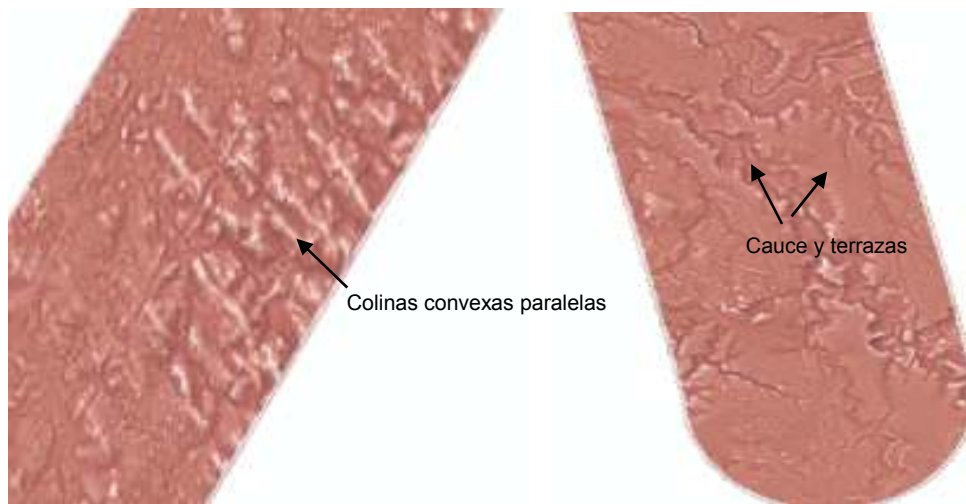


Figura 46. Visualización del terreno entre las abscisas km 40+000 y km 50+000 se observa colinas convexas paralelas híbridas y procesos erosivos en sus drenajes. Fuente: Elaboración propia, 2016.

De acuerdo a lo demostrado en las anteriores imágenes, se puede concluir que la información LiDAR es muy útil para todos los análisis de tipo geológico, lo que ayudará a comprender de forma más detallada el territorio. No obstante, como complemento en el análisis y para el interés en la adecuada planeación de proyectos de infraestructura se recomienda calcular ciertos índices asociados al terreno.

El resultado más importante en la parte geomorfológica es de tipo cualitativo. Donde la aplicación de la metodología RRIM y junto con el cálculo de líneas de escorrentía, Permitió exponer detalles de las geformas que estaban ocultas a lo largo de los 50 kilómetros, y que analizando los tipos de erosión dan un indicio del tipo de suelo en el terreno. Algo que no es posible de identificar empleando sólo una fotografía aérea, debido a que las coberturas no permiten ver los detalles del terreno o un plano topográfico tradicional que no brinda suficiente información del terreno por su poca densidad de puntos, además de estar limitado a áreas no tan extensas en comparación con el LiDAR.

La importancia de este insumo radica en la identificación de las zonas más aptas en función de su geomorfología para la localización de infraestructura. Donde las zonas montañosas con fuerte pendiente, las zonas con considerable cantidad de drenajes, además de su profundidad y forma, los planos de inundación reflejados en el terreno por procesos erosivos, debido a los eventos hidrológicos asociados a la precipitación, representan unas condiciones riesgosas para el trazado y las cuales deben evitarse en lo posible. En contraste con las zonas planas con poca densidad de drenajes, superficiales y poco profundas.



### **7.3.5.3. SPI (ÍNDICE DE FUERZA DE ESCORRENTÍA) Y CTI (ÍNDICE TOPOGRÁFICO COMPUESTO)**

Existen muchos tipos de riesgos: deslizamiento, incendio, inundación, subsidencia, etc. y los cuales se pueden cuantificar por medio de metodologías empleando software especializado con enfoque SIG (sistemas de información geográfica) siendo el principal insumo las diferentes imágenes provenientes de los sensores remotos. Y que son útiles para medir los impactos y generar planes de mitigación para reducir su impacto. (Lo que esta fuera del alcance de este estudio)

En el presente documento, se enfoca los esfuerzos en calcular los índices secundarios que corresponden a las líneas de drenaje, de SPI (índice de fuerza de escorrentía) y el CTI (índice topográfico compuesto) respectivamente. Los índices primarios corresponden al cálculo con un proceso directo sobre la imagen y los índices secundarios se obtienen mediante el cálculo tomando como insumo los índices primarios. Para la estimación de dichos índices, se empleará las técnicas sugeridas por el departamento de recursos Naturales de la [Universidad de Minnesota, \(2015\)](#). Usando los algoritmos de la herramienta Arcgis.

#### **ÍNDICE DE LINEAS DE DRENAJE**

La línea de drenaje se explica como “la línea que define el recorrido más probable de una gota de agua sobre un terreno inclinado, iniciando desde la parte más alta hasta llegar a la más baja que integran una hoya hidrográfica” ([Esri, 2016](#)).

Para el cálculo de estas líneas de drenaje, se debe usar una imagen que represente el terreno totalmente filtrada sin arboles e infraestructura, siendo el DTM la que aporta mayor información para este fin, debido a su contenido altimétrico, planimétrico y por supuesto su resolución espacial que es de un metro.

Como anteriormente se demostró, las líneas de drenaje ayudan en el análisis del territorio, dando indicios sobre las características del suelo por el que pasan de acuerdo a varios factores, como la forma del sistema que depende de la distribución de los tributarios, profundidad, entre otros.

Ahora bien, para proceder con el cálculo se debe iniciar con la estimación de los siguientes índices primarios: pendiente, orientación, dirección de flujo, relleno de depresiones topográficas.

Pendiente: se define como “el cambio de la elevación con respecto a su distancia, en Arcgis, para cada celda, la herramienta calcula la tasa máxima de cambio del valor de esa celda a sus vecinas. Básicamente, el cambio máximo en la elevación sobre la distancia entre la celda y sus ocho vecinas identifica el descenso cuesta abajo más empinado desde la celda. El ráster de pendiente de salida se puede calcular en dos tipos de unidades: grados o porcentaje (elevación en porcentaje). Para el presente estudio los valores calculados son en porcentaje” (Esri, 2016).

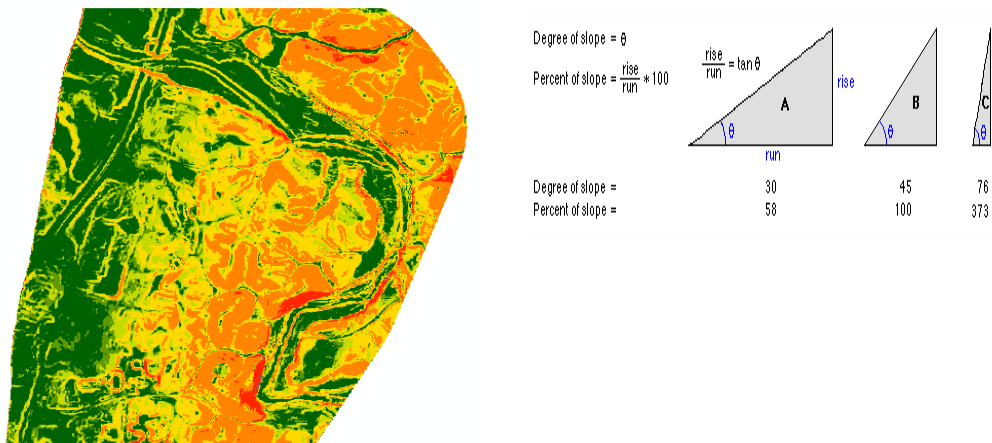


Figura 47. Imagen de pendiente del terreno y geometría del cálculo de la pendiente. Fuente: Elaboración propia, 2016; Esri, 2016.

Orientación: La Orientación identifica la “dirección de la pendiente descendente de la tasa de cambio máxima en un valor desde cada celda hacia sus vecinas. Puede pensarse como la dirección de la pendiente. Los valores de cada celda del ráster de

salida indican la dirección de brújula a la que apunta la superficie en esa ubicación. Se mide en el sentido de las agujas del reloj en grados de 0 (hacia el norte) a 360 (hacia el norte, nuevamente), formando un círculo completo. Las áreas planas que no tienen dirección de pendiente descendente tienen un valor de -1" (Esri, 2016).

El valor de cada celda de orientación indica la dirección a la que apunta la pendiente de la celda.

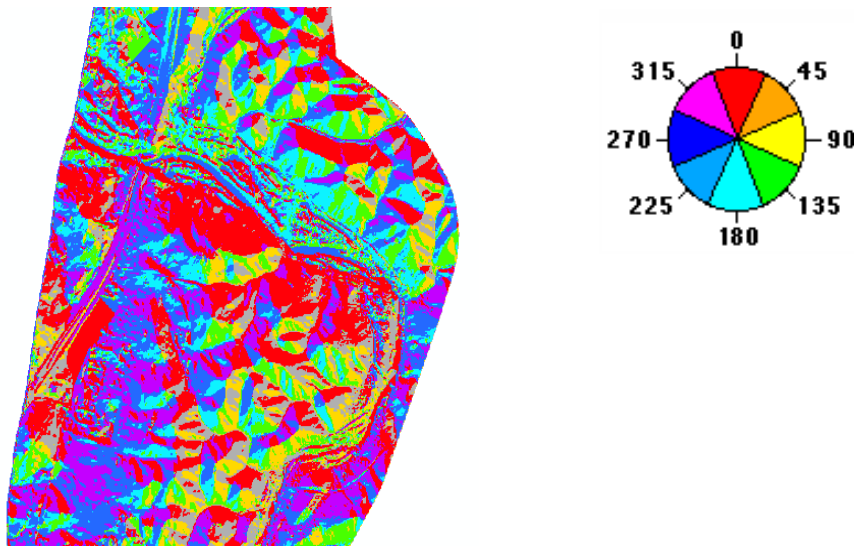


Figura 48. Imagen de orientación y diagrama de orientación. Fuente: Elaboración propia, 2016; Esri, 2016.

Relleno de depresiones topográficas: “a la hora de calcular nuestras líneas de drenajes, se debe tener en cuenta que el DTM presenta depresiones que deben ser rellenadas de tal forma actúen como zonas planas que puedan darle continuidad al flujo en sentido de la pendiente descendente, de lo contrario se crearían represas virtuales que actuarían como acumulación de flujo alejándose de la realidad. Un ejemplo son las carreteras, estas estructuras generalmente se encuentran por encima del terreno natural por lo que se representaría en el DTM como una represa, siendo esto falso ya que cuenta con drenajes como alcantarillas permitiendo el paso del flujo de forma ininterrumpida.

La herramienta utiliza los equivalentes de varias herramientas, como Flujo focalizado, Dirección de flujo, Sumidero, Cuenca hidrográfica y Relleno zonal, para ubicar y rellenar sumideros. La herramienta itera hasta que se rellenan todos los sumideros dentro del límite z especificada. A medida que se rellenan los sumideros, se pueden crear otros en los límites de las áreas rellenas, que se eliminarán en la siguiente iteración” (Esri, 2016).

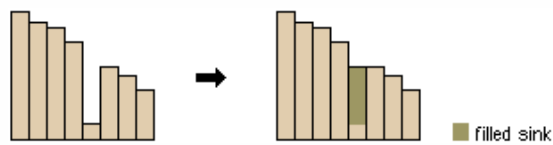


Figura 49: Ilustración del llenado de espacios. Fuente: Esri, 2016.

Acumulación de flujo: “se toma un DTM con relleno de las depresiones topográficas como entrada y proporciona como salida un ráster que muestra la dirección del flujo que sale de cada celda.

Existen ocho direcciones de salida válidas que se relacionan con las ocho celdas adyacentes hacia donde puede ir el flujo. Este enfoque comúnmente se denomina el modelo de flujo de ocho direcciones (D8)” (Esri, 2016).

La distancia se calcula entre los centros de las celdas. Por lo tanto, si el tamaño de celda es 1, la distancia entre dos celdas ortogonales es 1, y la distancia entre dos celdas diagonales es 1,414 (la raíz cuadrada de 2). Si el descenso máximo de varias celdas es el mismo, la vecindad se agranda hasta que se encuentra el descenso más empinado.

Cuando se encuentra la dirección de un descenso más empinado, la celda de salida se codifica con el valor que representa esa dirección.

Si todos los elementos próximos son más altos que la celda de procesamiento, se considerará un ruido que se rellena con el valor más bajo de los elementos próximos, y tiene una dirección de flujo hacia esta celda. Sin embargo, si un sumidero de una celda está junto al borde físico del ráster o tiene como mínimo una celda NoData como vecino, no se rellena porque la información del vecino no es suficiente. Para que se considere como un sumidero verdadero de una celda, debe estar presente toda la información de vecino.

Si dos celdas fluyen entre sí, se trata de sumideros que tienen una dirección de flujo indefinida. (Esri, 2016)

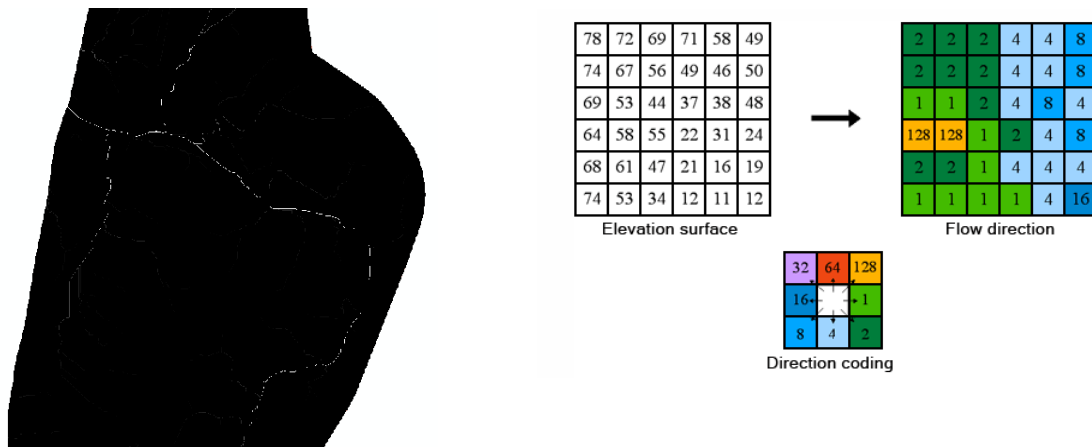


Figura 50. Imagen de dirección de flujo y diagrama. Fuente: Elaboración propia, 2016; Esri, 2016.

Una vez definido la dirección de flujo, se procede a reclasificar de acuerdo a la cantidad de celdas acumuladas, en el presente caso, como se cuenta con un área levantada con poco ancho, se usarán microcuencas de no más de 20.000 metros cuadrados de área, es decir, 2 hectáreas. Con la ventaja de obtener una red densificada de flujo lo que es útil a la hora de identificar red de drenajes para el análisis geomorfológico. La desventaja de una red densificada es el gran recurso informático que necesita para su procesamiento, consumiendo una considerable

cantidad de tiempo dejando que el algoritmo procese toda las celdas pertenecientes a la imagen.

Una vez realizado este paso se verifica los resultados, procurando que no se presente líneas que indiquen drenajes de forma errónea y que no correspondan con la realidad, una vez verificado, se procede en la conversión a una capa shapefile para visualización.

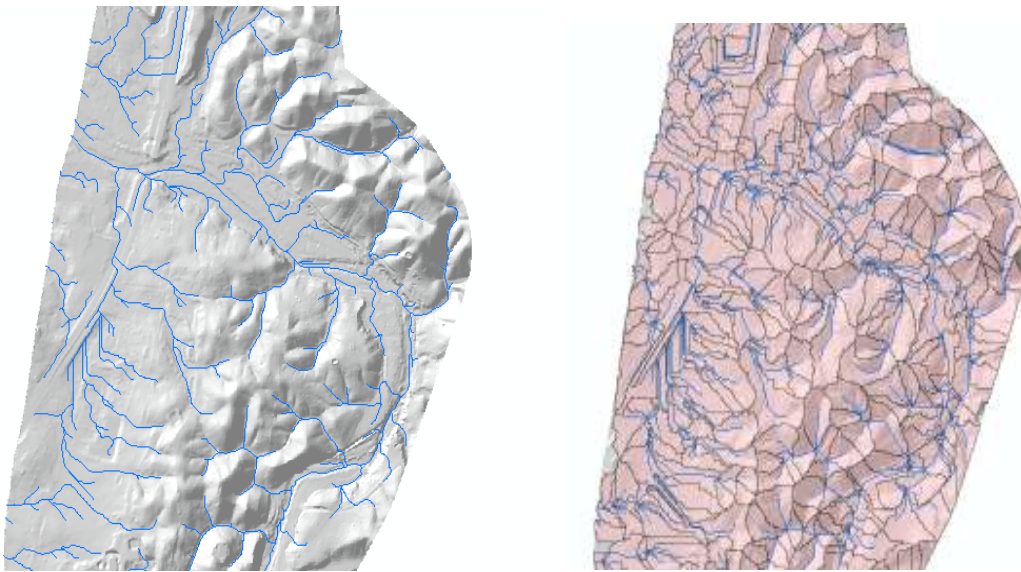


Figura 51. Imagen con líneas de drenaje y microcuencas después del procesamiento. Fuente: Elaboración propia, 2016.

En conclusión, para obtener y evaluar el índice de drenaje es necesario contar con los insumos apropiados para su procesamiento, aunque se necesita una gran cantidad de recursos informático para una red densificada, los resultados son satisfactorios y muy útiles para el análisis del terreno. No obstante, hay que tener cuidado con la metodología para que el algoritmo no arroje resultados erróneos como represas virtuales sobre zonas de terreno donde en realidad cuenta con infraestructura hidráulica y la cual no se ve reflejada en el DTM debido a que el pulso del láser no llega porque estas se encuentran justo debajo de la carretera. A esto

hay que agregarle el ángulo de incidencia desde el sensor, debido a que son menores de 10° no alcanza a tomar detalles laterales.

## **SPI (ÍNDICE DE FUERZA DE ESCORRENTÍA)**

El índice SPI se encarga de medir el potencial erosivo de las corrientes de drenaje sobre la superficie del terreno relacionando las cuencas con el flujo de escorrentía dentro de ellas. Una considerable cantidad de área perdida por erosión se presenta en tierras cultivadas, usualmente asociado al mal manejo de la capa vegetal sin tomar en cuenta las “buenas practicas” para un adecuado uso del suelo. Igualmente en las colinas o zonas montañosas con poca presencia de capa vegetal, los efectos potenciales de la erosión son críticos por su mayor pendiente. Basándose en la metodología de la ([Universidad de Minnesota, 2015](#)) se puede calcular las zonas con alta susceptibilidad a la erosión en función de su pendiente.

La ecuación del SPI se presenta a continuación:

$$\text{SPI} = \text{Ln} (A * \text{pendiente})$$

Donde A es la capa de acumulación de flujo.

Es claro que para llegar a la capa de acumulación de flujo se debe obtener los índices primarios de pendiente, orientación, dirección de flujo, relleno de depresiones topográficas. Los cuales ya fueron previamente calculados, pero para completar el proceso queda faltando el índice de curvatura, que se describe a continuación.

Curvatura: de acuerdo con (Esri, 2016). “La función de curvatura visualiza la forma o la curvatura de la pendiente. Una parte de la superficie puede ser cóncava o convexa. Es fácil de comprobar consultando el valor de la curvatura. La curvatura se obtiene calculando la derivada segunda de la superficie.

La salida de la función de curvatura se puede utilizar para describir las características físicas de una cuenca de drenaje para intentar entender los procesos de erosión y escorrentía. El valor de la curvatura se puede usar para encontrar los patrones de erosión de los suelos así como la distribución del agua en tierra. La curvatura del perfil afecta la aceleración y desaceleración del flujo y, por lo tanto, influye en la erosión y la sedimentación. La curvatura de la plataforma influye en la convergencia y divergencia del flujo”.

El tipo de curvatura acentúa diferentes aspectos de la forma de la pendiente. Existen de dos tipos:

#### Perfil

La curvatura de perfil es paralela a la pendiente e indica la dirección de la pendiente máxima. Afecta a la aceleración y desaceleración de las corrientes por la superficie. Un valor negativo (A) indica que la superficie es convexa hacia arriba en esa celda y la corriente se desacelerará. Un perfil positivo (B) indica que la superficie es cóncava arriba en esa celda y la corriente se acelerará. Un valor de cero indica que la superficie es lineal (C). (Esri, 2016).



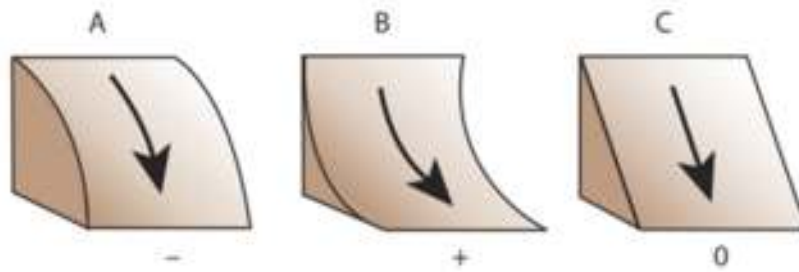


Figura 52. Tipo de curvatura de perfil. Fuente: Esri. 2016.

## Plano

La curvatura del plano es perpendicular a la dirección de la pendiente máxima. La curvatura del plano se relaciona con la convergencia y divergencia de la corriente por una superficie. Un valor positivo (A) indica que la superficie es lateralmente convexa en esa celda. Un plano negativo (B) indica que la superficie es lateralmente cóncava en esa celda. Un valor de cero indica que la superficie es lineal (C) (Esri, 2016).

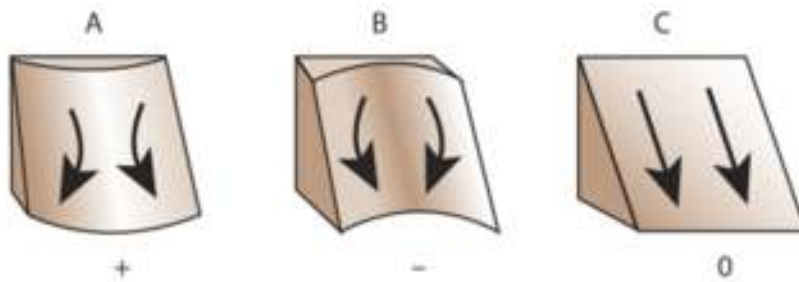


Figura 53. Tipo de curvatura de plano. Fuente: Esri, 2016.

Una vez aplicado el algoritmo sobre el DTM, se obtiene las imágenes que se pueden ver a continuación:

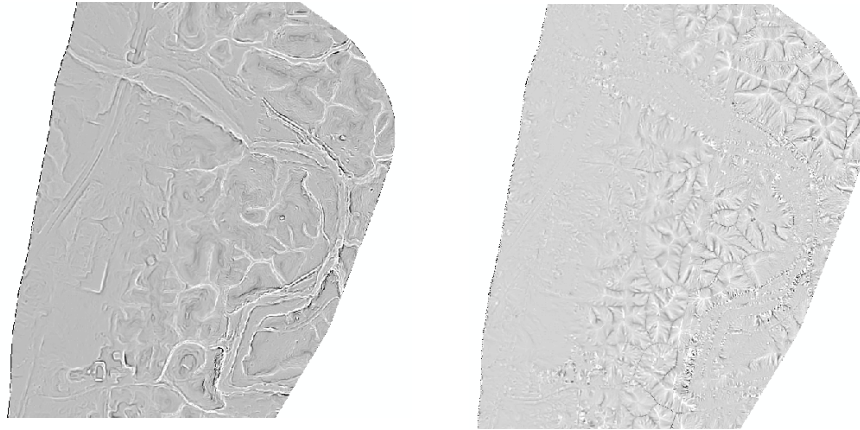


Figura 54. Imagen de curvatura de perfil y de plan respectivamente. Fuente: Elaboración propia, 2016.

La ventaja del índice de curvatura de perfil radica en que se puede visualizar las zonas de flujo convergente y divergente, y se complementa con la imagen RRIM para hallar características del suelo, en cambio la curvatura tipo plano brinda información de los sitios donde se acelera más el flujo y geoformas.

Ya una vez definido los índices primarios se procede en ejecutar la ecuación SPI, por definición, de acuerdo a la metodología de la [Universidad de Minnesota, \(2015\)](#). Los valores ubicados en el percentil igual o mayor al 75% reflejan las zonas más susceptibles a la erosión. Por lo tanto para efectos prácticos en la visualización, se reclasificó la imagen en los percentiles 75, 80, 90, 95 y 100 evidenciando el siguiente resultado:



Figura 55. Imagen donde muestra las zonas con mayor susceptibilidad de erosión en función de su pendiente y drenaje. Fuente: Elaboración propia, 2016.

Analizando la figura, se puede observar que la mayor susceptibilidad de la erosión se presenta en las áreas con mayor pendiente como las colinas, así como en las zonas donde existe fuerte cambio en la altura, por ejemplo, en los bordes del plano de inundación del río ubicado en el medio de la imagen. Resultados que son acordes a la teoría según la metodología. Lo que confirma un adecuado procesamiento.

## CTI (INDICE TOPOGRÁFICO COMPUESTO)

El índice CTI se encarga de medir el potencial de humedad de cualquier porción de tierra en un terreno. La humedad de un terreno está asociada a varios factores como la pendiente, área de la cuenca, tipo de suelo, cobertura y drenaje. No obstante, para el presente índice se relaciona las áreas de la cuenca del terreno y su pendiente, partiendo del principio que cuencas con gran tamaño y baja pendiente es más probable de generar humedad o que se empoce el agua. El objeto del índice es mostrar esas zonas probables a la hora de presentarse un evento de precipitación por lluvia en el terreno. Basándose en la metodología de la [Universidad de Minnesota, \(2015\)](#) se puede calcular el CTI con la siguiente ecuación:

$$CTI = \ln(A/pendiente)$$

Donde A es la capa de acumulación de flujo.

Al igual que el índice SPI, es claro que para llegar a la capa de acumulación de flujo se debe obtener los índices primarios de pendiente, orientación, dirección de flujo, relleno de depresiones topográficas. Los cuales ya fueron previamente calculados. Por lo tanto, se procede a ejecutar la ecuación CTI explicada, igualmente por definición, de acuerdo a la metodología de la Universidad de Minnesota, (2015). Los valores ubicados en el percentil igual o mayor al 75% reflejan las zonas más susceptibles a la retención de humedad. Por lo tanto para efectos prácticos en la visualización, se reclasificó la imagen en los percentiles 75, 80, 90, 95 y 100 reflejando el siguiente resultado:

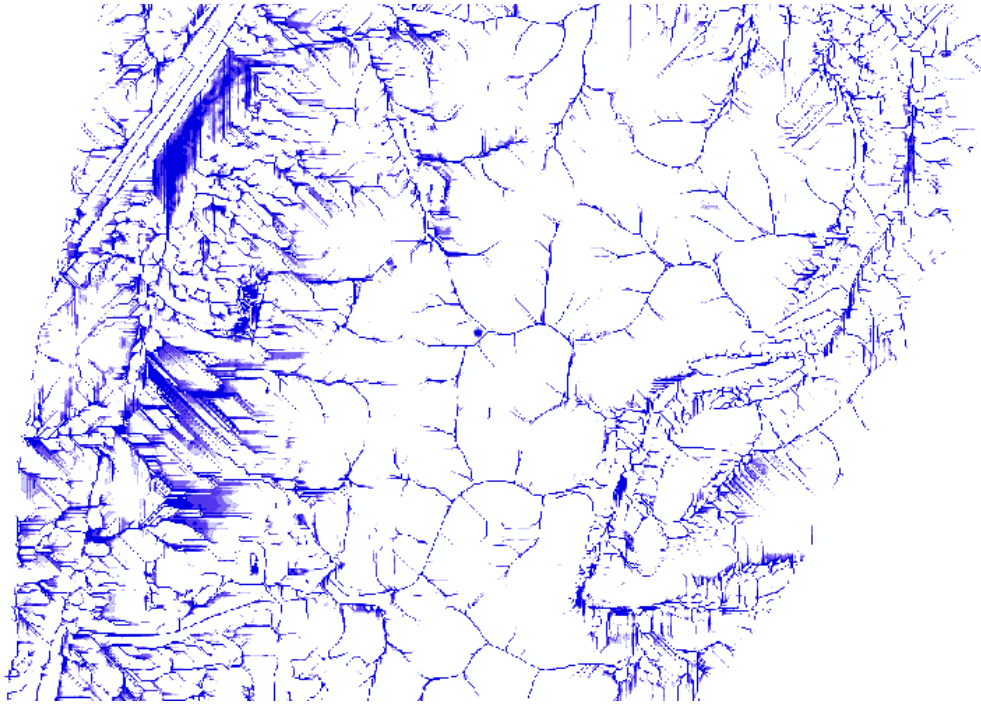


Figura 56. Imagen donde muestra las zonas con mayor susceptibilidad de retención de humedad en función de su pendiente y drenaje. Fuente: Elaboración propia, 2016.

Analizando la imagen, se puede observar que la retención de humedad se presenta más que todo en las zonas con baja pendiente y en los drenajes. Resultados que son acordes a la teoría según la metodología. Lo que confirma su correcto procesamiento.

Ya con el resultado de los índices SPI y CTI. Es posible combinar los resultados para ampliar la capacidad de análisis del territorio para efectos de la correcta interpretación y planeación en el diseño de proyectos de infraestructura.



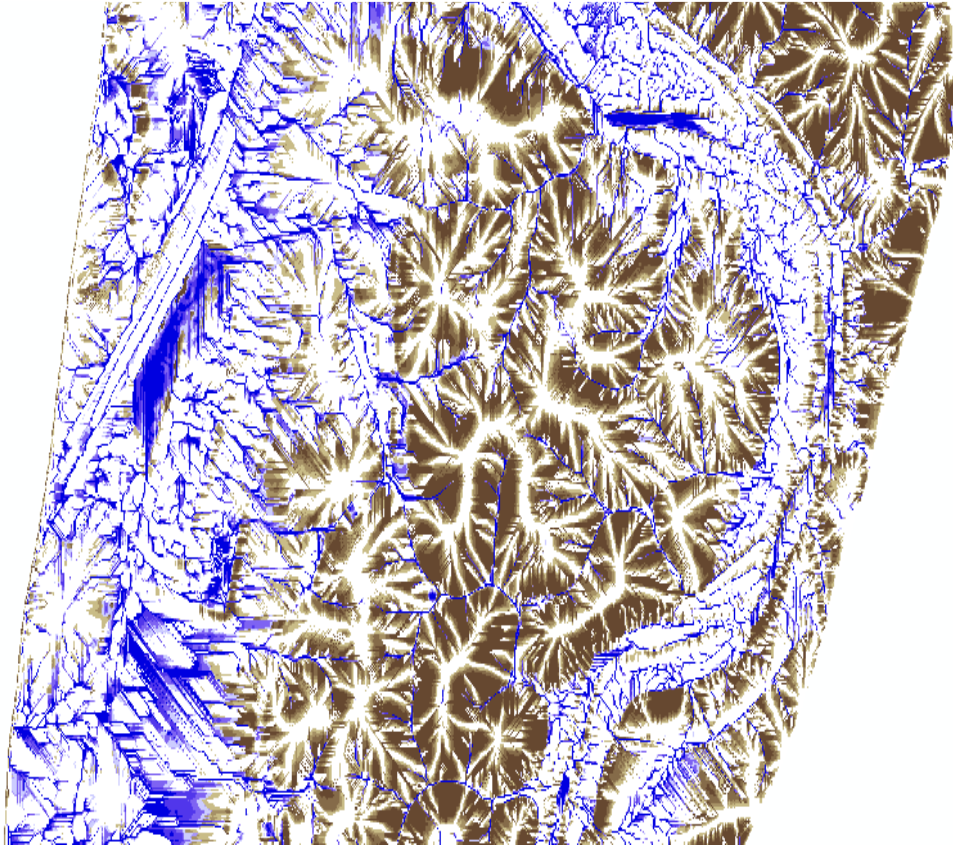


Figura 57. Imagen que combina los índices SPI y CTI. Fuente: Elaboración propia, 2016.

En la imagen que combina los dos índices se puede distinguir las zonas con mayor susceptibilidad a la erosión (color marrón) y a la retención de humedad (color azul).

El resultado más destacado es su utilidad como insumo para medir el riesgo (fuera del alcance de este estudio) sobre toda la zona correspondiente al levantamiento LiDAR (30 km<sup>2</sup>) y evaluar los lugares más óptimos para ubicar la futura obra de infraestructura, y generar planes de acción para el diseño de obras de mitigación y/o protección con el propósito de garantizar la durabilidad, estabilidad y confiabilidad del gasoducto durante su construcción y puesta en servicio. Este contribuye a la generación de presupuestos con un menor grado de incertidumbre impactando de forma positiva en el proyecto.

Aunque en topografías tradicionales es posible aplicar estos índices, el volumen de información disponible para su cálculo es mucho menor debido a la falta de detalle del terreno, lo que probablemente haría necesario emplear nuevas campañas de levantamiento topográfico en terreno, impactando más que todo en los tiempos además de costos adicionales.

#### **7.3.5.4. RESULTADOS Y CONCLUSIONES**

El resultado más importante del análisis geomorfológico es de tipo cualitativo. Donde la aplicación de la metodología RRIM y junto con el cálculo de líneas de escorrentía, Permitió exponer detalles de las geoformas que estaban ocultas a lo largo de los 50 kilómetros, y que analizando los tipos de erosión dan un indicio del tipo de suelo en el terreno. Algo que no es posible de identificar empleando sólo una fotografía aérea o un plano topográfico tradicional debido a que no tiene suficiente información del área de interés por su poca densidad de puntos, además de estar limitado a áreas no tan extensas en comparación con el LiDAR.

La importancia de este insumo radica en la identificación de las zonas más aptas en función de su geomorfología para la localización de infraestructura. Donde las zonas montañosas con fuerte pendiente, las zonas con considerable cantidad de drenajes, (además de su profundidad y forma), los planos de inundación reflejados en el terreno por procesos erosivos debido a los eventos hidrológicos asociados a la precipitación, representan unas condiciones riesgosas para el trazado y las cuales deben evitarse en lo posible. En contraste con las zonas planas con poca densidad de drenajes, superficiales y poco profundas, las cuales son más seguras.

Para la aplicación de los índices SPI Y CTI sobre levantamientos tradicionales. Lo más probable es que los resultados no reflejarían la realidad del terreno. Esto debido a que generalmente un levantamiento topográfico no contiene una gran densidad de puntos que permita representar de forma muy aproximada del terreno (lo que si hace el LiDAR) por lo tanto, la omisión de ciertos detalles influyen sobre el cálculo de los índices.

El resultado más destacado es su utilidad como insumo para medir el riesgo (fuera del alcance de este estudio) sobre toda la zona correspondiente al levantamiento LiDAR (30 km<sup>2</sup>) y evaluar los lugares más óptimos para ubicar la futura obra de



infraestructura, y generar planes de acción para el diseño de obras de mitigación y/o protección con el propósito de garantizar la durabilidad, estabilidad y confiabilidad de la obra durante su construcción y puesta en servicio. Este contribuye a la generación de presupuestos con un menor grado de incertidumbre impactando de forma positiva en el proyecto.

Aunque en topografías tradicionales es posible aplicar estos índices, el volumen de información disponible para su cálculo es mucho menor debido a la falta de detalle del terreno, lo que probablemente haría necesario emplear nuevas campañas de levantamiento topográfico en terreno, impactando más que todo en los tiempos además de costos adicionales.

El uso de DTM como insumo primario para aplicar técnicas de generación de los índices de acuerdo con las metodologías planteadas. Se perfilan como una técnica esencial para el análisis del territorio. Donde los métodos tradicionales como las campañas de campo, imposibilitan tener un amplio panorama a detalle de la totalidad del área de interés. Lo que permiten complementarse mutuamente para un mejor resultado a la hora del análisis.

### **7.3.4. HIDROLOGIA E HIDRAULICA.**

De acuerdo con [Ven te Chow, \(1994\)](#). “La hidrología se define como la ciencia natural que estudia el agua, su ocurrencia, circulación y distribución en la superficie terrestre, sus propiedades químicas y físicas y su relación con el medio ambiente, incluyendo los seres vivos”.

Tomando como base esta definición y ampliándola a la parte de la ingeniería se incluye aquellos conceptos que se atañen al diseño y operación de proyectos ingenieriles para el control y aprovechamiento del agua.

El ingeniero que se encarga de proyectar o construir nuevas infraestructuras debe ser consciente que encontrará condiciones del terreno donde es necesario “diseñar obras de protección que contrarreste la acción del agua sobre la nueva infraestructura, por lo tanto es necesario realizar análisis hidrológicos que cuantifiquen el evento más extremo y que permita ser la base de diseño de la obra de protección” [Aparicio, \(1992\)](#).

#### **7.3.4.1. CICLO HIDROLÓGICO**

De acuerdo con [Ven Te chow, \(1994\)](#). “El ciclo hidrológico es un fenómeno global de circulación del agua entre la superficie terrestre y la atmósfera, provocado fundamentalmente por la energía solar y la energía gravitacional. El ciclo hidrológico es el conjunto de cambios que experimenta el agua en la naturaleza, tanto en su estado (sólido, líquido y gaseoso), como en su forma (agua superficial, agua subterránea, etc.).

El ciclo hidrológico no es nada regular. Una muestra de ello son los periodos de sequías y de inundaciones, que ocurren. Se puede suponer que el ciclo hidrológico se inicia con la evaporación del agua en los océanos, el vapor de agua es transportado por el viento hacia los continentes. Bajo condiciones meteorológicas adecuadas, el vapor de agua se condensa para formar nubes, las cuales dan origen a las precipitaciones. No toda la precipitación llega al terreno, ya que una parte se evapora durante la caída y otra es retenida (intercepción) por la vegetación o los edificios, carreteras, etc. Y poco después, es devuelta a la atmósfera por medio de evaporación. Otra parte es retenida en huecos e irregularidades del terreno (almacenamiento en depresiones). Otra parte del agua que llega al suelo circula sobre la superficie (lluvia en exceso) y se concentra en pequeños surcos que luego se combinan en arroyos, los cuales desembocan en ríos (escurrimiento superficial), dichas aguas son conducidas a embalses, lagos u océanos, desde donde se evapora o infiltra en el terreno.

Si el agua infiltrada es abundante, una parte desciende hasta recargar el agua subterránea, cuando es escasa, el agua queda retenida como humedad del suelo en la zona no saturada, de donde vuelve a la atmósfera por evaporación o evapotranspiración. Por efecto de la gravedad, el agua percola hacia estratos más profundos, recargando las napas freáticas y/o confinadas, las cuales aportan flujo hacia las zonas de descarga en ríos, pantanos o vertientes. En el ciclo hidrológico, la velocidad del agua no es constante, sino, errática tanto espacial como temporalmente. Por otra parte, la calidad del agua cambia en cada fase del ciclo, siendo éste, el gran desalinizador de la naturaleza”.

### **7.3.4.3. ANALISIS HIDROLÓGICO**

Para todo proyecto de infraestructura es fundamental conocer el terreno y los riesgos asociados. Para ello se deben calcular diferentes índices. Ya previamente obtuvo algunos primarios como las pendientes del terreno, aspecto de la dirección del terreno, curvatura que mide la forma de terrenos cóncavos y convexos, drenajes y curvas de nivel cuya representación de polilíneas define la topografía de la zona. Además de los secundarios como el CTI y SPI.

Para el capítulo de hidrología, el propósito es generar modelos de inundación y socavación para zonas de drenaje pequeñas (aprovechando la imagen del LiDAR) y medianas (modelos digitales de terreno de mediana resolución) que se puedan presentar en el recorrido del potencial trazado del gasoducto. La selección de la cantidad y tipo de drenajes a modelar es a discreción del diseñador encargado, él se encargará de seleccionar los más representativos en el área debido a la imposibilidad de modelarlos en su totalidad por la gran cantidad de drenajes que se encuentran a lo largo de los 50 km.

Para el presente estudio, se modeló un arroyo ubicado cerca del km0+000 con el propósito de mostrar su utilidad y los buenos resultados para efectos de diseño del trazado de la infraestructura. Como lo ideal sería modelar más drenajes distribuidos a lo largo del potencial trazado del gasoducto, esto no fue posible debido al gran consumo de recursos informáticos, traducándose en extensos lapsos de tiempo para procesar la información, lo que es difícil por la restricción asociada a la fecha de cumplimiento del documento.

El proceso de análisis hidrológico, se iniciará definiendo la cuenca con la obtención de una imagen digital del terreno a nivel regional y que cubra toda la zona, se analizará los datos de precipitación de las estaciones pluviométricas más cercanas obtenidas del IDEAM, se calculará los principales tipos de cobertura empleando una

imagen Landsat 8 remuestreada a 15 metros de resolución espacial para obtener el número de curva de la zona junto con la capa de tipos de suelo del Servicio Geológico Colombiano empleando el software ecognition y arcgis, finalmente se modelará el caudal máximo de escorrentía en un periodo de 24 horas para un periodo de retorno de 100 años en el software HEC-HMS y se generará los modelos hidráulicos de inundación y de escorrentía del drenaje con el software IRIC.

## **PROCESAMIENTO IMAGEN MODELO DIGITAL DE TERRENO Y DELIMITACIÓN DE LA CUENCA DE ESTUDIO**

De acuerdo a la descripción en el inicio del documento, el trazado del futuro gasoducto Puente Doctor-Tucurinca se localiza al norte del Departamento del Magdalena, cerca de la cierra nevada de Santa Marta y cobija parte rural del municipio de Ciénaga y presenta una longitud aproximada de 50 km.

El primer paso es conseguir una imagen digital del terreno a mediana escala, especialmente en la zona ubicada aguas arriba de los drenajes que permita delimitar las cuencas de interés y de que se asegure que no se estará escaso de información al crearlas.

Se utilizó una imagen digital de terreno con resolución espacial de 12 metros del año 2011 y Swat de 80 km proveniente del sensor ALOS-PALSAR, el cual es un satélite de la agencia espacial japonesa JAXA. Es de tipo activo, con emisión de microondas a una frecuencia de 1270 Mhz ubicada sobre la banda L, ideal para análisis de geológico debido a que ofrece una mayor penetración de la capa vegetal y no se ve afectada por nubes o condiciones climáticas<sup>6</sup>.

---

<sup>6</sup> Para mayor información sobre sensores activos se recomienda Chuvieco, (1996).

La imagen se descargó del sitio web <https://vertex.daac.asf.alaska.edu/>. Con el siguiente código de identificación: AP\_26462\_FBS\_F0200\_RT1 lo que indica que ya tiene un preprocesamiento realizado y es entrega geolocalizada de acuerdo al elipsoide WGS84 y sus alturas son elipsoidales también. Para mayor información, puede ingresar al link adjunto.

Una vez descargada, se debe realizar una verificación para de la georreferenciación, lo que se puede confirmar una vez cargada en el software GIS. No obstante, revisando la calidad de los valores de los pixeles se pudo identificar que existe una gran cantidad de ellos sin información, en su mayoría, ubicados sobre el cuerpo de agua de la ciénaga Grande y el mar Caribe. Esto se debe a los efectos de la retrodispersión de la señal en estas superficies por lo que la señal es absorbida y no regresa al sensor. Por lo tanto es necesario aplicar técnicas de procesamiento de imágenes como relleno de pixeles por vecinos cercanos. Para el presente caso, como el área de trabajo es en una zona de montaña ubicada aguas arribas en dirección a la Sierra Nevada de Santa Marta se aprecia que la imagen no contiene ninguna falta de información o ruido que pueda afectar los posteriores análisis.

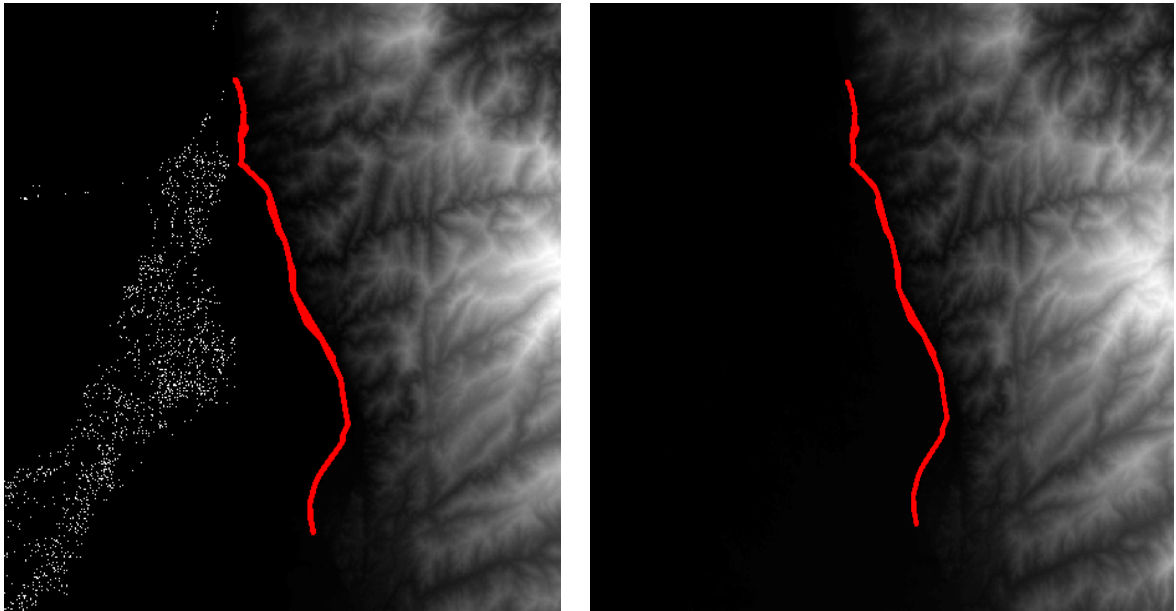


Figura 58. Imagen de modelo digital del terreno con el área de interés, obsérvese los píxeles sin información sobre la Ciénaga y el Mar (izq.) Imagen procesada aplicando técnicas de relleno por vecinos más cercanos (der.). Fuente: Elaboración propia, 2016.

Como ya se tiene identificada la zona de interés, es posible realizar un recorte de la imagen con el propósito de aligerar el tamaño de la misma y disminuir el consumo de recurso informático para su procesamiento. Por lo que opta hacer un recorte de tipo rectangular, asegurándose de que sea lo suficientemente grande de tal forma que no se tenga problemas en la delimitación de cuencas y subcuencas.

Al igual que en la generación de los drenajes explicados en el subcapítulo anterior, se debe proceder con la misma metodología para generar los drenajes medianos del presente modelo digital de terreno. Los índices primarios son: pendiente, orientación, dirección de flujo, relleno de depresiones topográficas. Una vez obtenidos estos índices se ejecuta el procesamiento de los drenajes arrojando el siguiente resultado.

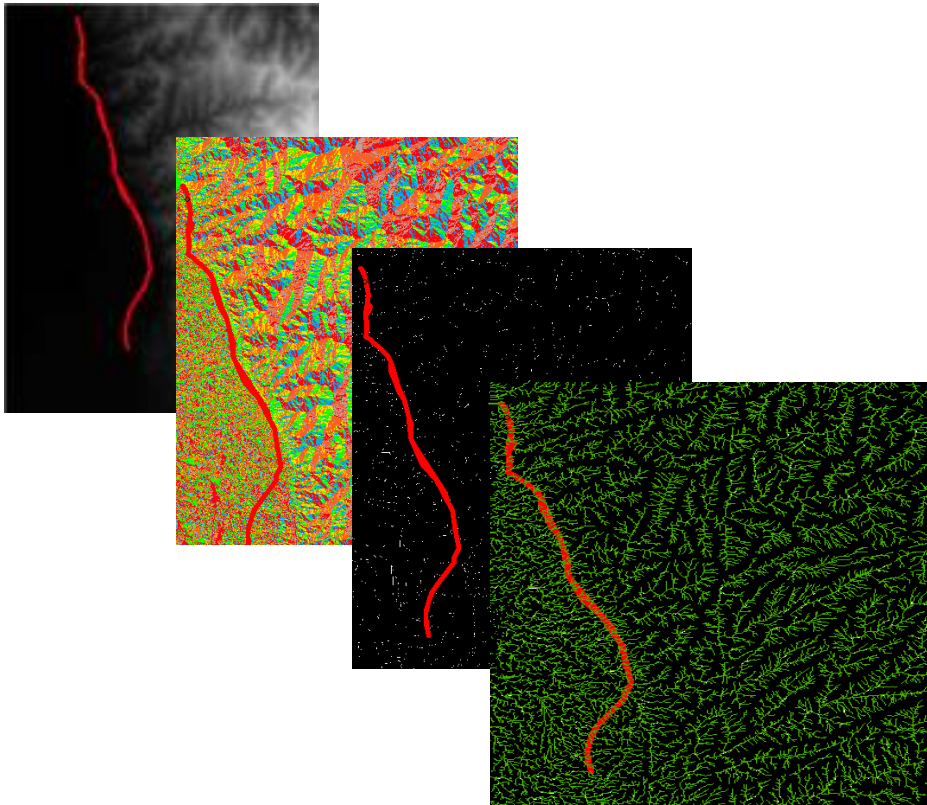


Figura 59. Imágenes que obtienen durante el procesamiento del modelo digital de terreno hasta obtener los drenajes. De arriba hacia abajo: DTM, Orientación, Dirección de flujo, Líneas de corriente. Fuente: Elaboración propia, 2016.

Tal vez la única diferencia con respecto al método de los drenajes del capítulo anterior, es que se individualiza las cuencas de acuerdo con el drenaje de interés lo que se traduce en reducción durante los tiempos de procesamiento.

Para el presente estudio se seleccionó un drenaje medio ubicado cerca del km0+000 de la zona de estudio.

De acuerdo con [Ven te Chow, \(1994\)](#) y [Esri, \(2016\)](#). “Una cuenca hidrográfica es el área de pendiente que contribuye con el flujo, generalmente agua, a una salida común como un drenaje concentrado. Puede ser parte de una cuenca hidrográfica más grande y también puede contener cuencas hidrográficas más pequeñas,



denominadas subcuencas. Los límites entre las cuencas hidrográficas se denominan divisiones de drenaje. La salida, o punto de fluidez, es el punto en la superficie en el que el agua fluye fuera de un área. Es el punto más bajo a lo largo del límite de una cuenca hidrográfica”.

Entonces para calcular la cuenca en Arcgis, se procede a geolocalizar el punto sobre el drenaje donde se indica que ese es el sitio de descarga y se desea conocer la cuenca que aporta el caudal hasta ese punto, y las características del área de contribución. Por lo que al finalizar el proceso, se obtiene el siguiente resultado.

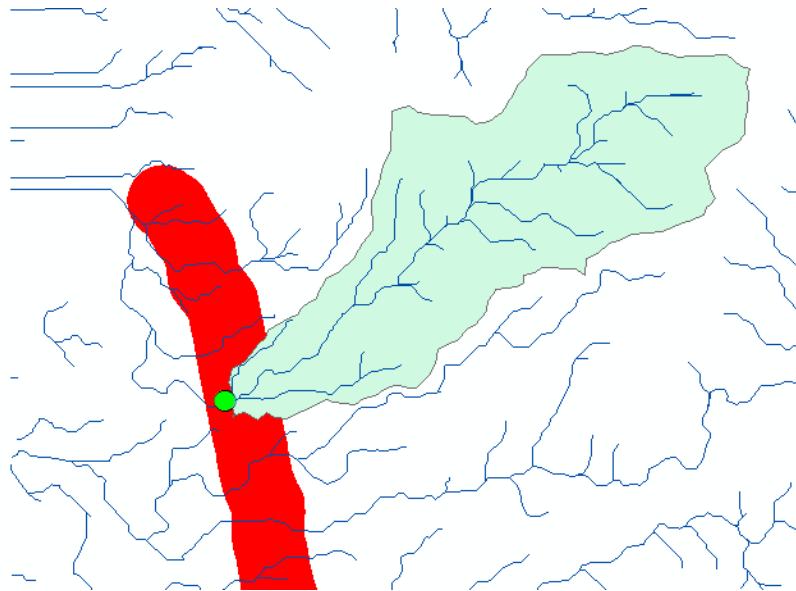


Figura 60. Imagen del punto de interés y la delimitación de la cuenca agua arriba. Fuente: Elaboración propia, 2016.

Hasta este punto se ha completado el proceso de obtención de la cuenca hidrográfica de estudio mediante el empleo de un modelo digital de terreno de mediana resolución. Al igual que los derivados del LiDAR, se tiene la posibilidad de extraer información útil para diferentes áreas de conocimiento, en este caso, la hidrología. Sin embargo, hay que tener cuidado con la calidad de la imagen ya que

puede presentarse errores en el ráster como los pixeles con información faltante. Por lo que se sugiere previa revisión de los archivos descargados de las páginas oficiales y aplicar los métodos de procesamiento de imágenes en caso de ser necesario.

De acuerdo con [Monsalve, \(1995\)](#). “Se debe definir las características físicas de una cuenca con respecto a su forma, procurando de medir numéricamente las influencias de dichas características. Esto es importante pues se relaciona con el tiempo de concentración, el cual es el tiempo necesario, desde el inicio de la precipitación, para que toda la hoya contribuya a la sección de la corriente de estudio, o, en otras palabras, el tiempo que toma el agua desde los límites más extremos de la hoya hasta llegar a la salida de la misma. La información sirve como finalidad para algunos índices que sirvan de comparación entre regiones hidrológicas”. Dentro de estas características están:

Área de drenaje (A): es el área plana (proyección horizontal) incluida entre su divisoria topográfica.

Coeficiente compacidad (kc): es la relación que existe entre el perímetro de la hoya y la longitud de la circunferencia de un círculo de área igual a la de la hoya. Cuanto más irregular sea la hoya mayor será su coeficiente de compacidad. Una hoya circular posee el coeficiente mínimo, igual a uno. Hay mayor tendencia a las crecientes en la medida en que este número sea próximo a la unidad.

$$Kc = 0.28P/A^{1/2}$$

Donde.

P: perímetro de la cuenca en km

A: área de drenaje de la cuenca en km<sup>2</sup>

Factor de forma (Kf): es la relación entre el ancho medio y la longitud axial de la hoya. La longitud axial de la hoya se mide cuando se sigue el curso de agua más largo desde la desembocadura hasta la cabecera más distante de la hoya.

Una hoya con factor de forma bajo esta menos sujeta a crecientes que otra del mismo tamaño pero con mayor factor de forma.

$$Kf = A/L^2$$

Donde.

L: longitud axial de la cuenca en km

A: área de drenaje en km<sup>2</sup>

Densidad de drenaje (Dd): es la relación entre la longitud total de los cursos de agua de la hoya y su área total.

$$Dd = \frac{L}{A}$$

Donde.

L: longitud total de los cursos de agua en km

A: área de drenaje en km<sup>2</sup>

Extensión media de la escorrentía superficial (I): se define como la distancia media en que el agua de lluvia tendría que escurrir sobre los terrenos de una hoya, en caso de que la escorrentía se diese en línea recta desde donde la lluvia cayó hasta el punto más próximo al lecho de una corriente cualquiera de la hoya. Considerando que una hoya de área A puede ser representada por un área de drenaje rectangular,

y teniendo un curso de agua longitudinal  $L$  igual a la longitud total de las corrientes de agua dentro de ella que pasa por su centro.

$$I = A/4L$$

Donde.

$L$ : longitud total de los cursos de agua en km

$A$ : área de drenaje en  $\text{km}^2$

Sinuosidad de las corrientes de agua: es la relación entre la longitud del río principal medida a lo largo de cauce y la longitud del valle del río principal medida en línea curva o recta.

Este parámetro da una medida de la velocidad de la esorrentía del agua a lo largo de la corriente. Un valor menor a 1.5 indica una baja sinuosidad. Se define, entonces, una corriente con alineamiento recto.

$$S = L/Lt$$

Donde.

$L$ : longitud de la corriente principal a lo largo de su cauce en km

$Lt$ : longitud del valle en km

Tiempo de concentración ( $T_c$ ): tiempo necesario para que toda la cuenca contribuya eficazmente a la generación de flujo en el desagüe. Comúnmente el tiempo de concentración se define como, el tiempo que tarda una partícula de agua caída en el punto más alejado de la cuenca hasta la salida del desagüe. Para el presente

estudio se empleó la ecuación de Kirpich por ser la que mejor se adapta a las cuencas pequeñas y medianas con pendientes Hasta del 20%.

$$Tc = 0.06628 \left( \frac{L}{pend.^{0.5}} \right)^{0.77}$$

Donde.

L: longitud de la corriente principal en km

Pend.: pendiente entre las elevaciones máxima y mínima (pendiente total) del cauce principal. En m/m

Teniendo en cuenta estas definiciones se calculó y se resumió las características físicas de la cuenca en la siguiente tabla:

Tabla 4: Características físicas de una cuenca hidrográfica.

Descripción	Unidad	Cantidad	Comentarios
Longitud total del cauce principal	km	5.23	
Longitud total de los cursos de agua	km	16.3	
Longitud axial de la cuenca:	km	4.6	
Perímetro de la cuenca:	km	12.76	
Área de drenaje (A):	Km <sup>2</sup>	6	
Coefficiente compacidad (kc):		1.459	Es una cuenca de tipo irregular
Factor de forma (Kf):		1.147	La cuenca está sujeta a crecientes
Densidad de drenaje (Dd):		2.717	Cuenca con buen drenaje
Extensión media de la escorrentía superficial (I):	km	0.092	
Sinuosidad de las corrientes de agua:		1.137	Baja sinuosidad
Tiempo de concentración (Tc):	horas	0.476	

Fuente: Elaboración propia, 2016.

## PRECIPITACIÓN

Según [Monsalve, \(1995\)](#). “Uno de los insumos primarios para los estudios hidrológicos desde el punto de vista de la ingeniería, es la precipitación de la lluvia, gracias estos datos se cuenta con la posibilidad de iniciar los cálculos de las obras requeridas para los fines de diseño de las diferentes estructuras. Este un factor climatológico esencial del ciclo hidrológico de una región y es influido directamente por otros factores como la temperatura, humedad del aire y los vientos.

La precipitación está sujeta a fenómenos atmosféricos. Uno de ellos es la circulación atmosférica la cual mide la distribución general de los vientos sobre la superficie del planeta e influye directamente en la formación de las condiciones climatológicas y por lo tanto en las precipitaciones, las condiciones climatológicas se desprenden algunas definiciones como la presión atmosférica el cual es el peso de la columna de aires que gravita, sobre una unidad de área, dividido entre dicha unidad de área. La unidad de medida es el bar y la referencia es la presión que existe en promedio al nivel del mar con temperatura de cero grados.

Presión de vapor: es la presión que ejercería la cantidad de vapor de agua si todos los otros gases estuvieran ausentes y se expresa como el peso de una columna de vapor por unidad de área.

Presión de vapor de saturación: es la presión de vapor que existe en una masa de aire cuando está saturada.

Humedad relativa: se mide por medio de un hidrógrafo y es la relación entre la presión de vapor real y la de saturación.

Humedad absoluta: es la masa de vapor de agua contenida en una unidad de volumen de aire.”

[Ven te Chow, \(1994\)](#). Indica “para que se formen las nubes, el agua que se evapora de la superficie terrestre debe elevarse hasta que la presión y la temperatura sean las necesarias para que exista condensación, es decir, hasta que se pueda alcanzar el punto de rocío. Cuando una masa de aire asciende, se ve sujeta a una presión gradualmente decreciente; entonces se expande y, al expandirse, en virtud de las leyes de los gases, disminuye su temperatura. Si la temperatura disminuye lo suficiente como para quedar por abajo del punto de rocío, puede comenzar la condensación. Esta tiene lugar al unirse varias de las pequeñas gotas que forman las nubes para formar gotas más grandes; sin embargo, para que esta unión se verifique en cantidades significativas sin la intervención de otros elementos, es necesario que la supersaturación (temperaturas más bajas que el punto de rocío) sea mayor de la que normalmente se produce en la atmósfera; en esas condiciones se tendrán núcleos de condensación (unión de varias gotas) uniformes”.

Adicionalmente [Monsalve, \(1995\)](#). Menciona que “las precipitaciones pueden ser clasificadas de acuerdo con las condiciones que producen el movimiento vertical del aire:

Convectivas: cuando una masa de aire próxima a la superficie del terreno aumenta su temperatura, la densidad disminuye y la masa de aire trata de ascender y de ser reemplazada por otra masa de aire más densa.

Este proceso es bastante lento las masas de aire están en calma y no hay turbulencia. En cambio, en regiones tropicales donde estas precipitaciones son muy típicas, el calentamiento desigual de la superficie terrestre provoca el resurgimiento de estratos de aire con densidades diferentes, y genera una estratificación térmica de la atmósfera en equilibrio inestable.

Si ese equilibrio es roto por cualquier motivo (viento, supercalentamiento), provoca una ascensión brusca y violenta del aire menos denso, capaz de alcanzar grandes latitudes.

Esas precipitaciones son de gran intensidad y corta duración, y se concentran en pequeñas áreas. Son importantes en proyectos de pequeñas cuencas hidrográficas.

Orograficas: resultan de la ascensión mecánica de corrientes de aire húmedo con movimiento horizontal cuando chocan barreras naturales, tales como montañas.

Convergencia: en realidad son de tres tipos, la primera es la convergencia propiamente dicha, la cual se presenta en el caso en que dos masas de aire de aproximadamente la misma temperatura, que viajan en dirección contraria, se concentran a un mismo nivel. El choque entre las dos masas de aire hace que ambas se eleven. La segunda, el ciclón, es una masa de aire circular con baja presión que gira en el sentido contrario al de las manecillas del reloj en el hemisferio norte. Tiene en su centro el “ojo del ciclón”, en el cual la presión es baja comparada con la masa de aire. Funciona, entonces como una chimenea, haciendo subir el aire de las capas inferiores. El anticiclón es una zona de alta presión circular, que gira en el sentido de las manecillas del reloj en el hemisferio norte.

En el evento de las precipitaciones, es muy difícil obtener información del 100% de los datos meteorológicos por medio de sondeos. Por lo que se debe estimar por medio de cálculo numérico la lámina de agua precipitada a partir de datos meteorológicos de aparatos especiales distribuidos a lo largo de la geografía del territorio, y que reflejan con precisión la cantidad de agua precipitada en su sitio de influencia. Y la tercera, el frente, es cuando una masa de aire en movimiento, encuentra otra más de aire de diferente temperatura. Si la masa de aire en movimiento es fría y encuentra en su camino otra de temperatura superior, el aire de esta última, por ser menos denso, se eleva sobre la capa de aire frío formando



un frente frío. Si la masa de mayor temperatura encuentra en su movimiento una más de aire frío, se forma un frente cálido.”

Como se mencionó en el anterior párrafo, Las precipitaciones se miden por medio de aparatos especialmente diseñados para la toma de muestras y expresarlas en forma de datos. Estos aparatos son los pluviómetros y pluviografos. Y de acuerdo con [Breña y Jacobo, \(2002\)](#) para su adecuada operación requiere de lo siguiente:

“El diámetro del orificio del dispositivo de captación no debe de ser menor a 30 mm; el límite superior parece no ser relevante.

Los pluviómetros pueden estar enterrados o colocados a 1 m de altura desde la superficie del terreno. El uso de protectores contra viento no mejora la calidad de la medición.

Los instrumentos deben colocarse en espacios abiertos y no deben existir objetos dentro de la sección cónica imaginaria que se forma al colocar el vértice en el instrumento y las proyecciones de las generatrices con un ángulo de 45° respecto a la superficie del terreno.

La información de precipitación pluvial se genera en forma discreta, utilizando el pluviómetro y realizando las lecturas totales acumuladas en intervalos de 6, 12 o 24 horas. Si se utiliza el pluviógrafo se obtiene un registro continuo de la precipitación, siendo posible analizar la variación temporal de la lluvia en intervalos de minutos. La medición más común en las estaciones climatológicas son los valores discretos de los pluviómetros.”

En Colombia la institución encargada de recopilar y suministrar información hidrológica es el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM. Ellos cuenta con una red de pluviómetros y pluviografos distribuidos a lo

largo de la geografía nacional, los datos recopilados por los aparatos van a una base de datos histórica y cuyo periodo es desde los años 1960 hasta la actualidad, es importante resaltar que contar con esta información es esencial para efectos de cualquier tipo de estudio relacionado con la hidrología. En la actualidad, el suministro de la información de las estaciones es gratuita y puede ser solicitada a través de su página oficial, previa inscripción la cual también es gratuita. Una vez en la página web en 'solicitudes', se debe ingresar el nombre de las estaciones, el tipo de información y periodo de tiempo. Recibirán la información en un periodo no mayor a 20 días.

Para consultar la ubicación de las estaciones, el IDEAM cuenta con las coordenadas geográficas de cada una de ellas y por lo que se pueden llevar a una geolocalización para efectos de visualización. En el presente estudio, se solicitó información de las precipitaciones máximas diarias de los últimos 30 años de las estaciones pluviométricas más cercanas ubicadas dentro del área de influencia del proyecto. Las estaciones seleccionadas fueron: El Carmen, El Palmor, La Palma, La Playa, La Sara, Minca, San Pablo, Vista Nieves. Y cuya ubicación geográfica se ve en la siguiente figura.

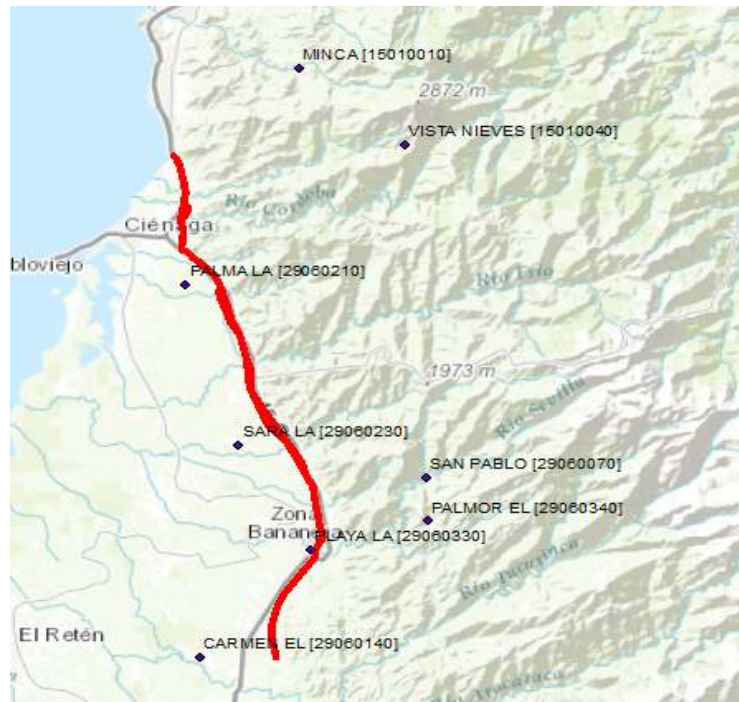


Figura 61. Ubicación de las estaciones Pluviométricas usadas en el Estudio. Fuente: IDEAM, 2016.

Para el análisis estadístico de los datos hidrológicos y sus respectivos modelos, se basará en las recomendación del Manual de drenajes para Carreteras del [INVIAS, \(2009\)](#). Ya que se caracteriza para obras hidráulicas de infraestructura en Colombia, con las mejores prácticas para cuestiones de estudio y diseño hidráulico adaptada al contexto de las diferentes circunstancias del territorio Nacional.

Los datos suministrados por el IDEAM de cada de las estaciones seleccionadas, se remitieron en un formato adaptado, de tal forma que se puedan visualizar la máxima precipitación diaria. Ver figura.

Figura 62. Formato de los datos pluviométricos.

I D E A M - INSTITUTO DE HIDROLOGIA, METEOROLOGIA Y ESTUDIOS AMBIENTALES										SISTEMA DE INFORMACION NACIONAL AMBIENTAL		
VALORES TOTALES DIARIOS DE BRILLO SOLAR (Horas)										ESTACION : 15015020 YE LA		
ANO 1979										FECHA-INSTALACION 1967-JUL		
FECHA DE PROCESO : 2015/07/08										FECHA-SUSPENSION		
LATITUD	1059 N	TIPO EST	CO	DEPTO	MAGDALENA							
LONGITUD	7412 W	ENTIDAD	01 IDEAM	MUNICIPIO	CIENAGA							
ELEVACION	0020 m.s.n.m	REGIONAL	05 MAGDALENA	CORRIENTE	CORDOBA							
*****												
DIA	ENERO *	FEBRE *	MARZO *	ABRIL *	MAYO *	JUNIO *	JULIO *	AGOST *	SEPTI *	OCTUB *	NOVIE *	DICIE *
*****												
01	10.0 3	9.5 3	8.0 3	7.4 3	5.1 3	4.1 3	10.9 3	3.3 3	5.1 3	9.0 3	9.8 3	10.2 3
02	10.4 3	10.0 3	10.0 3	9.6 3		.0 3	.2 3	8.6 3	2.7 3	9.0 3	9.0 3	10.3 3
03	10.4 3	10.3 3	8.6 3	5.3 3	11.2 3	10.2 3	5.6 3	7.0 3	4.3 3	7.3 3	7.4 3	10.4 3
04	10.4 3	9.9 3	7.5 3	7.7 3	6.1 3	4.8 3	5.3 3	11.4 3	9.0 3	9.2 3	8.0 3	10.3 3
05	11.2 3	9.9 3	9.2 3	8.8 3	10.1 3	.0 3	7.3 3	11.4 3	6.5 3	6.5 3	9.9 3	10.3 3
06	10.1 3	8.9 3	8.2 3	7.5 3	11.3 3	2.8 3	7.7 3	9.3 3	9.4 3	2.7 3	10.7 3	10.6 3
07	10.3 3	8.9 3	5.8 3	10.4 3	11.3 3	2.2 3	3.4 3	10.6 3	8.9 3	10.0 3	6.0 3	9.3 3
08	10.4 3	9.7 3	5.1 3	9.4 3	9.7 3	7.9 3	6.0 3	6.8 3	6.0 3	9.2 3	9.2 3	10.1 3
09	9.7 3	9.1 3	5.9 3	10.9 3	10.4 3	7.3 3	6.7 3	4.3 3	6.5 3	5.6 3	8.9 3	
10	8.8 3	8.5 3	8.6 3	9.3 3	11.3 3	9.7 3	7.9 3	10.5 3	6.9 3	7.0 3	9.1 3	10.2 3
11	10.1 3	9.1 3	6.8 3	11.0 3	10.6 3	10.6 3	6.5 3	11.4 3	.1 3	4.4 3	7.1 3	10.3 3
12	10.0 3	9.2 3	8.4 3	10.5 3	9.8 3	5.4 3	9.4 3	10.5 3	3.0 3	1.2 3	5.5 3	10.5 3
13	10.3 3	9.7 3	8.4 3	10.7 3	6.7 3	5.5 3	9.5 3	9.1 3	6.3 3	10.6 3	5.3 3	10.7 3
14	9.0 3	9.0 3	8.9 3	9.7 3	11.1 3	5.7 3	5.3 3	2.5 3	4.7 3	8.8 3	6.2 3	4.5 3
15	10.2 3	9.9 3	8.0 3	2.2 3	4.2 3	8.3 3	1.3 3	5.4 3	.0 3	9.4 3	4.5 3	7.0 3
16	10.6 3	9.9 3	9.3 3	5.2 3	4.3 3	1.3 3	7.7 3	.0 3	7.7 3	5.4 3	7.6 3	7.7 3
17	10.3 3	10.0 3	8.5 3	2.4 3	2.5 3	7.3 3	4.1 3	6.3 3	6.2 3	5.0 3	9.3 3	6.2 3
18	9.3 3	9.9 3	7.8 3	7.9 3	1.8 3	11.6 3	5.0 3	7.1 3	8.4 3	4.1 3	9.2 3	5.7 3
19	10.3 3	10.0 3	7.4 3	7.4 3	9.8 3	10.9 3	7.1 3	5.2 3	2.5 3	5.8 3	10.4 3	7.7 3
20	10.2 3	10.4 3	7.8 3	8.8 3	7.1 3	4.1 3	7.2 3	7.5 3	4.7 3	3.1 3	6.4 3	7.8 3
21	10.1 3	9.7 3	7.9 3	9.9 3	8.8 3	8.2 3	10.2 3	1.1 3	7.7 3	9.2 3	5.2 3	7.9 3
22	8.9 3	9.0 3	6.8 3	1.8 3	6.3 3	6.8 3	4.5 3	8.7 3	5.6 3	2.8 3	9.7 3	10.3 3
23	8.8 3	9.0 3	7.5 3	7.1 3	7.3 3	2.0 3	6.8 3	9.1 3	8.3 3	6.3 3	10.1 3	9.0 3
24	9.3 3	9.4 3	6.8 3	10.0 3	10.7 3	9.0 3	7.9 3	5.0 3	7.6 3	7.3 3	8.5 3	10.8 3
25	10.1 3	9.3 3	5.9 3	7.7 3	10.6 3	8.4 3	4.8 3	3.8 3	8.1 3	9.1 3	10.4 3	10.6 3
26	10.1 3	9.5 3	5.1 3	3.4 3	10.6 3	8.3 3	10.7 3	4.0 3	7.9 3	6.8 3	4.8 3	10.2 3
27	8.5 3	6.8 3	4.0 3	3.4 3	10.2 3	8.7 3	8.4 3	8.9 3	9.1 3	.6 3	8.6 3	8.4 3
28	7.8 3	9.7 3	10.0 3	.3 3	10.5 3	1.6 3	10.8 3	3.7 3	7.8 3	.0 3	10.4 3	9.4 3
29	9.0 3		10.4 3	3.5 3	7.8 3	.0 3	10.3 3	8.5 3	10.1 3	.0 3	9.5 3	9.4 3
30	9.2 3		10.4 3	6.5 3	.9 3	9.8 3	4.6 3	6.6 3	7.0 3	6.3 3	4.8 3	10.4 3
31	8.7 3		9.5 3		5.0 3		11.1 3	2.9 3		9.5 3		9.7 3
TOTAL	302.5 3	264.2 3	242.5 3	215.7 3	243.1 3	182.5 3	214.2 3	210.5 3	188.1 3	191.2 3	241.5 3	275.9 3
** DATOS PRELIMINARES **			*** VALORES ANUALES ***								** ORIGENES DE DATO **	
			TOTAL		2771.9					3 :	INCOMPLETOS	

Fuente: IDEAM, 2015.

Los datos del formato pertenecen a la máxima precipitación diaria. De acuerdo al alcance del estudio se calculó el máximo caudal probable durante 24 horas de lluvia en un periodo de retorno de 100 años. Por lo tanto, el dato de interés es el máximo caudal en un año, debido a la metodología que se empleó, por lo que se debe hacer una depuración de la información. En la tabla siguiente puede observar los valores de la máxima precipitación anual en 24 horas de las estaciones.

Tabla 5: Datos de Precipitación máxima anual en 24 horas.

**Precipitación máxima anual en 24 horas (mm)**

<b>año</b>	<b>San pablo</b>	<b>Minca</b>	<b>El carmen</b>	<b>La palma</b>	<b>La playa</b>	<b>El palmor</b>	<b>La sara</b>	<b>Vista nieves</b>
<b>1960</b>	49							
<b>1961</b>	100							
<b>1962</b>	85							
<b>1963</b>	86							
<b>1964</b>	50							
<b>1965</b>	88							
<b>1966</b>	72							
<b>1967</b>	84		80	49				
<b>1968</b>	80		82	53				
<b>1969</b>	81	180	153	73				
<b>1970</b>	68	105	110	75				
<b>1971</b>	104	105	62	54			90	
<b>1972</b>	76		53	155			80	
<b>1973</b>	78	61	111	92			71	75
<b>1974</b>	72	95	74	71			100	80
<b>1975</b>	90	180	80	81		95	75	80
<b>1976</b>	163	103	68	90		150	127	85
<b>1977</b>	130	95	73	120		105	152	58
<b>1978</b>	148	105	113	130		100	75	29
<b>1979</b>		92	101	75		95	126	59
<b>1980</b>	74	58	131	117		127	70	110
<b>1981</b>	112	63	87	238		109	121	98
<b>1982</b>	60	48	70	80		77	88	61
<b>1983</b>	75	92	78	110		82	75	83
<b>1984</b>	113	80	61	98		112	90	129
<b>1985</b>	164	90	41	94		93	107	104
<b>1986</b>	114	85	95	74		90	132	112
<b>1987</b>	160	91	75	88		87	80	110
<b>1988</b>	91	108	130	96.5		90	79	93
<b>1989</b>	76	83.4	155	89.4		130	60	55
<b>1990</b>	97	86.5	150	102.1	90	72	153	87
<b>1991</b>	75	85	85	57.7	82	90	132	68
<b>1992</b>	103	92	100	100	105	130	88	75
<b>1993</b>	137	140	96	72	84	150	130	90
<b>1994</b>	85	78	64	99.3	100	89	73	60
<b>1995</b>	135	80	135	80	220	110	135	80
<b>1996</b>	72	137	140	46	130	97	92	133
<b>1997</b>	99	118	80	70.3	69	140	89	93

<b>1998</b>	93	80	150	166	110	80	108	98
<b>1999</b>	135	100	130	90.5	120	130	104	101
<b>2000</b>	90	104	130	80	51	90	98	93
<b>2001</b>	96	81	100	62	130	100	118	84
<b>2002</b>	165	54.3	130	50.4	136	130	102	95
<b>2003</b>	69	76.5	102	71.5	90	80	97	80
<b>2004</b>	117	133.9	85	109.5	130	120	121	100
<b>2005</b>	115	58.6	94	52.2	85	110	119	75
<b>2006</b>	86	67.6	96	102.5	123	60	27	95
<b>2007</b>	21	94.8	99	75.6	100	90	56	68
<b>2008</b>	143	70.1	130	140.9	80	90	68	125
<b>2009</b>	170	73.6	180	74.9	66	80	72	72
<b>2010</b>	110	105.4	130	84	130	30	62	86
<b>2011</b>	70	74.5	120	112.5		90		87
<b>2012</b>	139	82.4	120	77.2		100		82
<b>2013</b>	75	70.3	115	95.3		76		80
<b>2014</b>	56	33.8	60	6.1		60		36

Fuente: Elaboración propia, 2016.

Como se puede identificar, no existe una continuidad de la toma de los datos para las estaciones, esto se debe a factores externos como daños en el aparato, robo o simplemente porque cumplió su vida útil. Lo ideal es tener la mayor homogeneidad posible en la muestra para que a la hora de modelar se tenga resultados más confiables. Y para lograr esto, se aplica métodos estadísticos como curvas de regresión para proyecciones sobre una ventana de tiempo, de esta forma poder llenar estos vacíos. No obstante, para el ejercicio académico del estudio, se decidió continuar con la información disponible con el propósito de agilizar los tiempos de procesamiento estadístico y cumplir con los tiempos de entrega.

## **ANÁLISIS ESTADÍSTICOS DE LOS DATOS DE PRECIPITACIÓN**

A continuación se hará una descripción y definición del proceso estadísticos usado para cada una de la estaciones, los resultados de estos procesos están en los anexos y se agregará las principales imágenes de los resultados.

Para cada una de las estaciones se aplicaron métodos estadísticos que resume la cantidad de cifras y simplifique su análisis para su interpretación.

### **Medidas de tendencia central**

Las medidas de tendencia central permite condensar en un sólo valor central alrededor del cual todos los datos muestrales se distribuyen. Chao, (1997).

La media: más conocida como media aritmética, es el promedio de la sumatoria de los datos sobre el número total de muestras.

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

Donde:

X: es la media

$x_i$ : n dato de la muestra

La mediana: se define como el valor que divide las frecuencias de una distribución de probabilidades e partes iguales o, en otras palabras es el valor que ocurre con una probabilidad del 50%.

La moda: el valor que ocurre con mayor frecuencia en una distribución de la tabla de frecuencias de una serie de datos agrupados.

### **Medidas de dispersión**

Se encargan de mostrar la variabilidad de una distribución de datos y referente sobre la media.

Desviación estándar: mide el grado de dispersión de los datos con respecto a la media.

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (xi - \bar{X})^2}{n - 1}}$$

Donde:

S: Desviación estándar

Xi: n dato de la muestra

X: es la media

Varianza: es la desviación estándar al cuadrado.

$$Var = S^2$$

Donde:

Var: es la varianza

S: Desviación estándar

Rango: Diferencia entre los valores mayor y menor de la serie



Coeficiente de Variación: es la desviación estándar sobre la media.

$$Cv = \frac{S}{\bar{X}}$$

Donde:

Cv: Es el coeficiente de variación.

S: es la desviación estándar

X: es la media

De acuerdo a las medidas de tendencia central y de dispersión se resume los datos de las estaciones en la siguiente tabla:

Tabla 6: Tabla Resumen medidas de tendencia central y de dispersión.

	Estación							
<b>Medida de tendencia central</b>	El Carmen	El palmor	La palma	La playa	La sara	Minca	San Pablo	Vista Nieves
Media	102.17	98.40	89.20	106.24	96.05	91.04	98.07	102.17
Mediana	99.50	94.00	82.50	100.00	91.00	86.50	90.00	99.50
Moda	130.00	90.00	80.00	130.00	75.00	105.00	72.00	130.00
<b>Medida de dispersión</b>								
Desviación estándar	31.23	24.96	36.09	35.68	27.99	29.31	33.31	31.23
varianza	975.33	622.76	1302.14	1272.79	783.48	859.13	1109.28	975.33
coeficiente de variación	0.31	0.25	0.40	0.34	0.29	0.32	0.34	0.31
rango	139.00	120.00	231.90	169.00	126.00	146.20	149.00	139.00

Fuente: Elaboración propia, 2016.

## Distribución de probabilidad y periodo de retorno

De acuerdo con el [INVIAS, \(2009\)](#). “En obras hidráulicas se exige la determinación de la magnitud de las características hidrológicas que pudieran ocurrir con cierta frecuencia para valores máximos durante un período determinado. Para esto, se

deben analizar estadísticamente las observaciones realizadas en los puestos de medida, verificando con qué frecuencia tomaría cada una de ellas determinado valor. Posteriormente, se pueden evaluar las probabilidades teóricas.

Con el fin de ir más allá de los datos históricos suministrados por los registros a disposición (es decir, poder calcular estadísticamente eventos hidrológicos en un futuro, como caudales de creciente), es necesario ajustar los datos a distribuciones de probabilidad conocidas (como la Gumbel o la log-Pearson tipo III, en el caso de valores extremos) y, si el ajuste es adecuado, elaborar inferencias estadísticas, es decir, ir más allá de tales datos y calcular sus valores con probabilidades mayores o menores a las suministradas por los mismos y, aún más, dar una mejor estimación en el rango de probabilidades dado por los referidos datos históricos.

Los valores máximos en hidrología de drenaje (precipitación o caudales), deben ser tratados a través de distribuciones probabilísticas.

Aunque existen numerosas distribuciones de probabilidad para valores máximos, es muy común en hidrología utilizar para estos valores las distribuciones de probabilidad Gumbel (escuela europea) y log-Pearson Tipo III (escuela americana)."

Para el presente estudio se aplicara la distribución Gumbel la cual es una función de probabilidad utilizada usualmente para valores máximos aleatorios sacados de poblaciones suficientemente grandes.

$$P(x \leq x_i) = e^{-e^{-yi}}$$

Donde:

$x_i$ : Variable aleatoria.

$e$ : Base de los logaritmos neperianos

$y_i$ : Variable reducida

Tomando la solución de ajuste a esta distribución de probabilidad por medio del método de los momentos, se tiene:

$$y_i = a(x_i - x_f)$$

$$a = S_n/S$$

$$x_f = X - S \frac{Y_n}{S_n}$$

Donde:

$X$ : media.

$S$ : desviación estándar.

$X_i$ : datos de la muestra desde  $i$  hasta  $n$ .

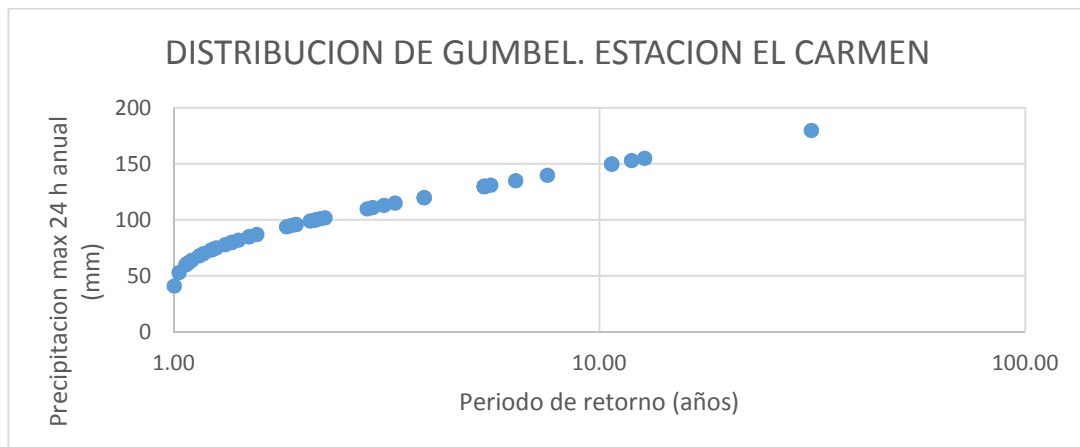
$Y_n$  y  $S_n$ : depende del número de años de registros de la muestra  $n$ , y son respectivamente la media y la desviación estándar de la variable.

El periodo de retorno se define como periodo de retorno  $T$  de eventos hidrológicos máximos en obras de drenaje vial, el tiempo promedio, expresado en años, en que el valor del caudal pico de una creciente determinada es igualado o superado una vez.

$$Tr = 1/(1 - P(x \leq x_i))$$

Las tablas de cálculo y gráficos de cada una de las estaciones se pueden observar en los anexos. Para efectos de referencia se anexa en el documento el gráfico de la estación el Carmen.

Figura 63. Grafico de Distribución Gumbel.



Fuente: Elaboración propia, 2016.

### Curva de intensidad-duración-frecuencia IDF

Continuando con la metodología del [INVIAS, \(2009\)](#) las curvas de intensidad-duración- frecuencia, IDF, son arreglos en los cuales se presentan las lluvias (estimadas como intensidad de precipitación) contra su duración y el periodo de retorno.

Para Colombia se propone el método de [Diaz-Granados y Vargas, \(1998\)](#). En este estudio, se dedujeron curvas intensidad-duración-frecuencia por correlación con la precipitación máxima promedio anual en 24 horas, el número promedio de días de lluvia al año, la precipitación total media anual y la elevación de la estación.

La mejor correlación obtenida, sin embargo, fue la que se obtuvo con la precipitación máxima promedio anual en 24 horas en una estación, y es la que se propone para los estudios, además de que es la más sencilla de utilizar.

Tabla 7. Valores de los coeficientes a, b, c y d para el cálculo de las curvas intensidad-duración-frecuencia, IDF, para Colombia.

REGIÓN	a	b	c	d
Andina (R1)	0.94	0.18	0.66	0.83
Caribe (R2)	24.85	0.22	0.50	0.10
Pacífico (R3)	13.92	0.19	0.58	0.20
Orinoquía (R4)	5.53	0.17	0.63	0.42

Fuente: INVIAS, 2009.

Aplicando la metodología se reflejan los resultados en la siguiente Tabla para la estación El Carmen. Los resultados de las demás estaciones se encuentran en Anexos.

Tabla 8. Tabla de Intensidad-Duración-Frecuencia para la estación de El Carmen.

ESTACION	EL CARMEN				
	INTENSIDAD (mm/hr)				
	PERIODO DE RETORNO				
DURACION (min)	5	10	25	50	100
10	137.75	160.45	196.28	228.62	266.28
20	97.41	113.45	138.79	161.66	188.29
30	79.53	92.63	113.32	131.99	153.73
40	68.88	80.22	98.14	114.31	133.14
50	61.61	71.75	87.78	102.24	119.08
60	56.24	65.50	80.13	93.33	108.71
70	52.07	60.64	74.19	86.41	100.64
80	48.70	56.73	69.40	80.83	94.14
90	45.92	53.48	65.43	76.21	88.76
100	43.56	50.74	62.07	72.29	84.20
110	41.53	48.38	59.18	68.93	80.29

120	39.77	46.32	56.66	66.00	76.87
130	38.21	44.50	54.44	63.41	73.85
140	36.82	42.88	52.46	61.10	71.17
150	35.57	41.43	50.68	59.03	68.75
160	34.44	40.11	49.07	57.15	66.57
170	33.41	38.91	47.61	55.45	64.58
180	32.47	37.82	46.26	53.89	62.76
190	31.60	36.81	45.03	52.45	61.09
200	30.80	35.88	43.89	51.12	59.54
210	30.06	35.01	42.83	49.89	58.11
220	29.37	34.21	41.85	48.74	56.77
230	28.72	33.46	40.93	47.67	55.52
240	28.12	32.75	40.07	46.67	54.35
250	27.55	32.09	39.26	45.72	53.26
260	27.02	31.47	38.49	44.84	52.22
270	26.51	30.88	37.77	44.00	51.24
280	26.03	30.32	37.09	43.20	50.32
290	25.58	29.79	36.45	42.45	49.45
300	25.15	29.29	35.84	41.74	48.62
310	24.74	28.82	35.25	41.06	47.82
320	24.35	28.36	34.70	40.41	47.07
330	23.98	27.93	34.17	39.80	46.35
340	23.62	27.52	33.66	39.21	45.67
350	23.28	27.12	33.18	38.64	45.01
360	22.96	26.74	32.71	38.10	44.38
540	18.75	21.83	26.71	31.11	36.24

---

Fuente: Elaboración propia, 2016.

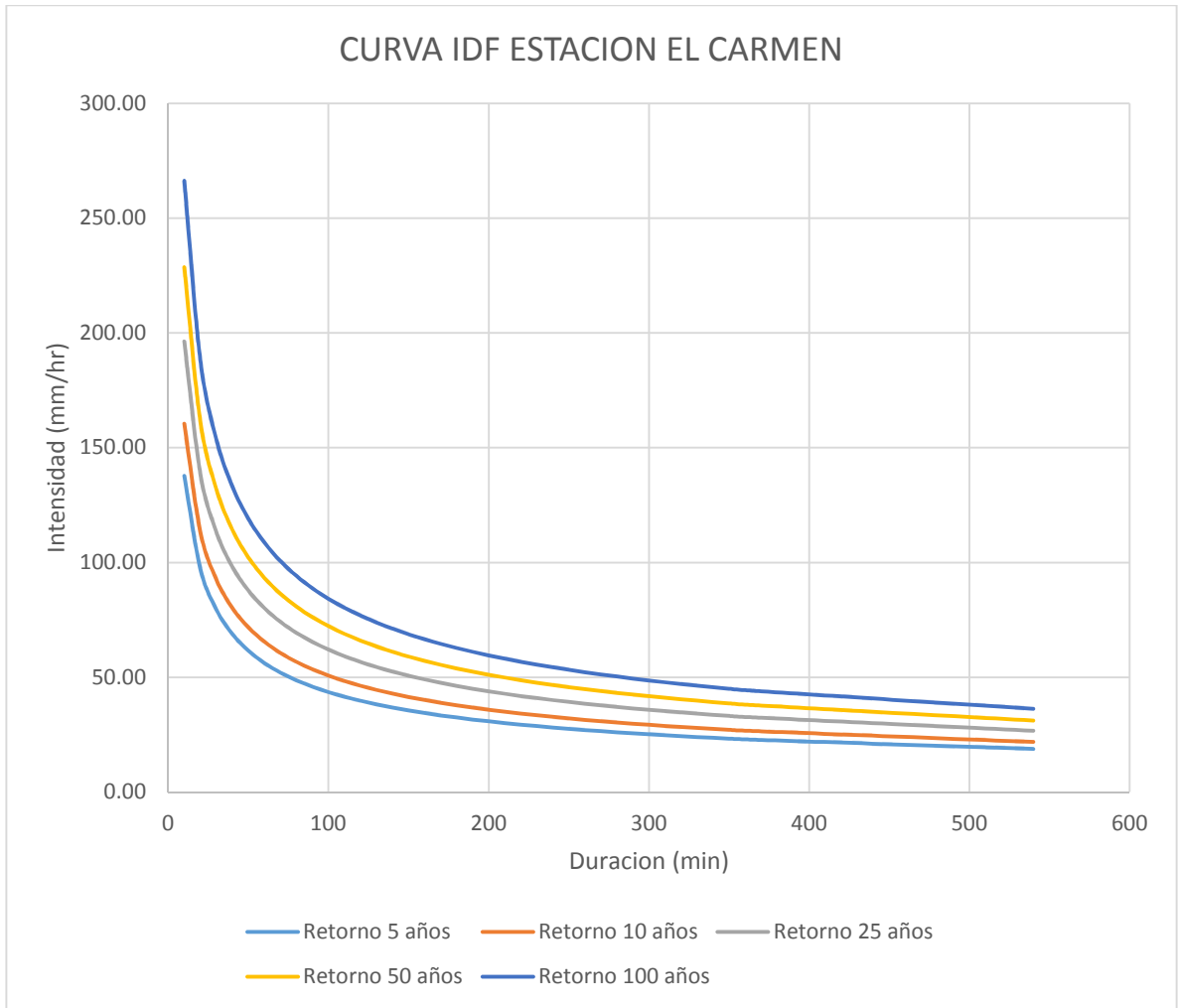


Figura 64. Curva IDF para la estación El Carmen. Fuente: Elaboración propia, 2016.

### Curva de masas e Hietograma

El INVIAS, (2009) define que “El registro pluviográfico de un aguacero da como resultado una curva de masas de precipitación, o una curva de lluvias acumuladas, o la cantidad de agua que ha caído desde que se inició el aguacero.”

Un histograma es la distribución temporal de la intensidad o de la profundidad de una precipitación a lo largo de la duración del episodio tormentoso.

Para obtener hietogramas a partir de curvas IDF se aplicará el método de los bloques alternos. La ventaja que tiene este método es que su resultado se aprovecha como dato de precipitación en programas de modelos hidrológicos como HEC-HMS.

El hietograma a modelar es para una precipitación de 24 horas con un periodo de retorno de 100 años.

En la siguiente figura se observa hietograma de la Estación El Cármen.

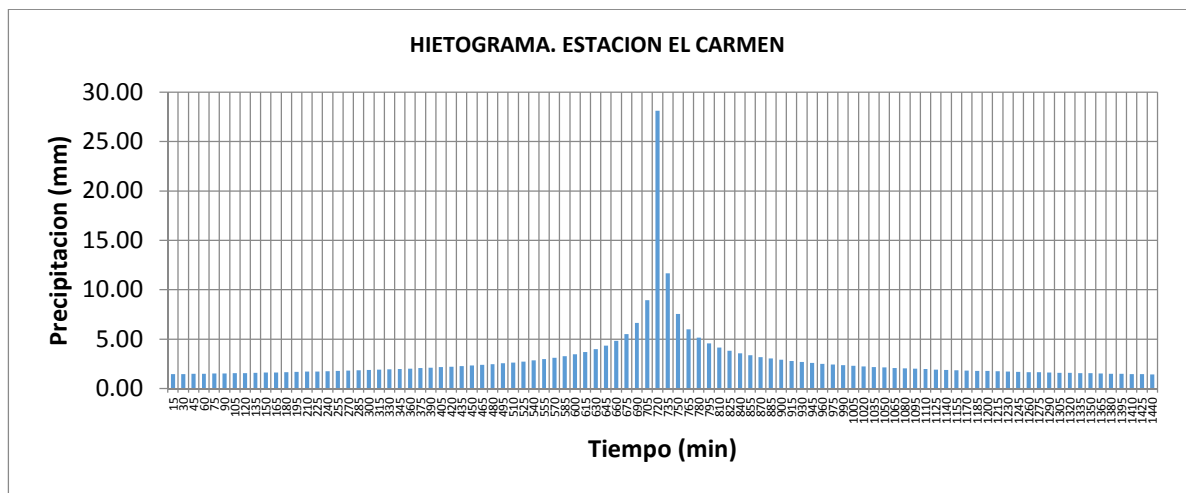


Figura 65. Hietograma para la estación El Carmen. Fuente: Elaboración propia, 2016.

## COBERTURAS

Como parte del desarrollo del modelo hidrológico, es necesario conocer el tipo de cobertura que existe sobre la cuenca objeto de estudio. Una ventaja es que se cuenta con una fotografía de muy alta resolución espacial (10 cm por pixel) la cual brinda un detalle espectacular de la cobertura. El problema radica en que el tamaño



de la imagen no es suficientemente grande para cubrir el área de la cuenca, por lo que no es posible extraer información para determinar las coberturas y por lo tanto es un insumo de entrada incompleto para el modelado Hidrológico.

En este orden de ideas, se tiene la necesidad de contar con una imagen de un tamaño idóneo y que garantice como mínimo, la cobertura de las cuencas, además de contar con la suficiente resolución espacial para distinguir las coberturas e iniciar el modelo hidrológico.

En este punto, se considera las imágenes multiespectrales provenientes del sensor landsat-8<sup>7</sup>. Lo especial de estas imágenes, es que contiene ciertas características que ayuda a mejorar la clasificación de las diferentes coberturas que existen sobre el terreno y por lo tanto realizar una clasificación que represente de una forma más precisa la realidad.

A continuación se presenta una breve descripción del landsat-8.

El Landsat 8 fue lanzado el 11 de febrero de 2013 y declarado operacional el 30 de mayo de 2013. A partir de esa fecha la NASA cede el control al servicio Geológico de Estados Unidos (USGS) quien se encarga del control del satélite, generación y almacenamiento de datos etc.

El Landsat 8. Tiene dos sensores principalmente:

*Operational Land Imager (OLI)*: sensor que capta el espectro visible, infrarrojo cercano (NIR) e infrarrojo de onda corta (SWIR). Tiene una resolución de 15 metros en pancromático y de 30 m en multiespectral.

---

<sup>7</sup> En la página web de la USGC (U.S geological survey) se incluye amplia información de la constelación Landsat

*Thermal Infrared Sensor* (TIRS): sensor que mide la temperatura de la superficie terrestre mediante dos bandas del infrarrojo térmico (10 y 11). Gracias a los principios de mecánica cuántica es capaz de distinguir la temperatura de la superficie de la temperatura de la atmósfera. Los datos generados por este sensor tienen una resolución de 100 m y son de gran valor para medir la evapotranspiración y el consumo de agua en agricultura.

Landsat 8 dispone de 11 bandas (3 más que el anterior Landsat-7: aerosoles, cirrus y una más en infrarrojo térmico). (USGS, 2016)

Tabla 9. Bandas Landsat-8.

<b>Numero de Banda</b>	<b>Longitud de onda (micrometros)</b>	<b>Resolución espacial (metros)</b>
1 (coastal/aerosol band)	0.433–0.453	30 m
2 (Blue)	0.450–0.515	30 m
3 (Green)	0.525–0.600	30 m
4 (Red)	0.630–0.680	30 m
5 (NIR)	0.845–0.885	30 m
6 (SWIR 1)	1.560–1.660	60 m
7 (SWIR 2)	2.100–2.300	30 m
8 (Panchromatic)	0.500–0.680	15 m
9 (Cirrus)	1.360–1.390	30 m
10 (TIRS 1)	10.6-11.2	100 m
11 (TIRS 2)	11.5-12.5	100 m

Fuente: USGS, 2016.

Un aspecto importante de mencionar es que las imágenes de la constelación Landsat son totalmente gratuitas y pueden descargarse de la página USGS previo registro del usuario. El proceso es sencillo pero se recomienda contar con una buena velocidad de red para descargar los casi 1000 Megabytes (1 Gigabyte) que pesa cada imagen.

Haciendo todo el proceso previo la imagen descargada fue la siguiente:

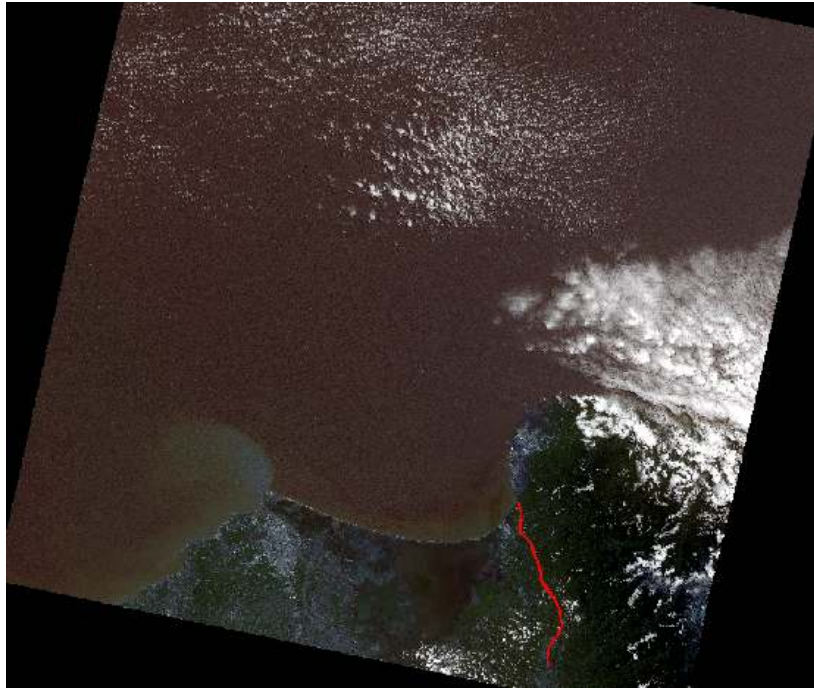


Figura 66. Imagen Landsat 8 completa en banda RGB. Fuente: Elaboración propia, 2016.

Como se puede apreciar en la imagen, el tamaño cubre una zona bastante extensa y va más allá de las necesidades del estudio. (Las imágenes descargadas tienen un tamaño de 185 km de ancho). Por lo que es adecuado hacer un corte de la misma.

La imagen es de nivel 1T (Level-1T) esto quiere decir que la imagen esta geométricamente rectificada por el uso de puntos de control terrestre y empleando modelos de elevación digital y está proyectada sobre el *Universal Transverse Mercator* con Datum WGS84. Calibrada a un resolución radiométrica de 16 bits y con fecha de toma de diciembre de 2015.

Como el interés es hacer una clasificación de las principales coberturas del suelo sobre la presente imagen. Se utilizarán, las técnicas de procesamiento para cumplir con el objetivo.

### **Remuestreo a 15 metros**

Como principio en la teledetección, toda superficie presenta un particular comportamiento espectral, es decir, la forma de reflejar la energía en las diferentes longitudes de onda. Este reflejo puede mostrarse en una curva espectral la cual presenta diferentes niveles de reflectividad de acuerdo al tipo de longitud de onda; siendo la de infrarrojo ubicado en el espectro de longitud de onda corta (SWIR) más sensible a la humedad (A. Schowengerdt, 2007; Richards, 2013).

Para propósitos de clasificación de la superficie es más conveniente usar las longitudes de ondas desde el espectro visible hasta el infrarrojo cercano. Para la imagen Landsat, Las bandas que están dentro de este rango tienen una resolución de 30 metros por lo que se debe hacer un remuestreo a 15 metros tomando como base la banda pancromática. Esto es conveniente para propósitos del estudio ya que se mejora la resolución espacial y se obtiene más información del terreno.

El remuestreo consiste en llevar el tamaño de pixel grande a uno más fino por medio de transformaciones geométricas, esencialmente el algoritmo toma los pixeles de los vecinos más cercanos y se asigna un valor promedio de los datos de estos pixeles a la imagen de salida (Chuvieco, 1966).

### **Conversión de los niveles digitales a valores de reflectividad aparente.**

“Una gran parte de la transmisión de energía se produce a través del cuerpo gaseoso que rodea el planeta: la atmósfera. Sin embargo, en el tránsito de la radiación hacia el sensor, la atmósfera no se comporta como un cuerpo

transparente, sino que impone a la misma un conjunto de modificaciones que es necesario conocer al utilizar cualquier sistema de teledetección. Los efectos son muy variados, destacando por su influencia en la teledetección espacial las modificaciones en la intensidad, frecuencia y distribución espectral de la radiación impuestas por la dispersión y la absorción atmosféricas. Ambas dependen de la altura de la capa atmosférica que debe atravesar la radiación (que en el caso de los satélites espaciales es generalmente toda) antes de ser captada por el sensor, de su propia composición, del contenido en partículas en suspensión y de las longitudes de onda en las que opere el sensor.

En lo referente a la dispersión atmosférica (conocida con el término inglés "*scattering*"), este fenómeno aparece a causa de la difusión en todas las direcciones que las partículas en suspensión y las moléculas de los componentes de la atmósfera, producen sobre la radiación que interacciona con ellos. De forma general, este efecto de dispersión decrece a medida que aumenta la longitud de onda, aunque pueden distinguirse varios tipos: Dispersión "*Rayleigh*", Dispersión "*Mie*", Dispersión "no selectiva". Entonces, debido a la modificación de los valores causados por este efecto, se reduce el contraste de la imagen y se aplica el método de corrección atmosférica.

Este proceso permite convertir la información de la imagen original (radiancia) de cada pixel, de Niveles Digitales -ND- a Niveles de Reflectancia captada por el sensor en el tope de la atmosfera, es decir, sin los efectos de la misma, lo que permite disminuir los efectos de dispersión o absorción causados por la presencia de partículas en la atmósfera. Adicionalmente, se busca remover el efecto de los diferentes ángulos de incidencia de la energía solar y de la distancia Tierra - Sol, que se producen como consecuencia de las diferencias de tiempo de adquisición de las imágenes. También es conveniente su aplicación en el caso de utilizar imágenes de diferentes tipos de sensores, pues permite normalizar las diferencias de valores de la radiación solar causados por las diferencias de los rangos

espectrales entre las bandas de las imágenes. En general con estas correcciones se busca minimizar los errores que influyen en la radiación o en el valor radiométrico de cada elemento captado en la escena. El proceso de corrección atmosférica puede aplicar opcionalmente la corrección de neblina y/o el enmascaramiento de nubes, por lo cual es necesario inspeccionar previamente la imagen para detectar la presencia de nubes y/o neblina evidente. Como resultado final de este sub-proceso, se obtiene una imagen en valores de reflectancia que mejora la separabilidad espectral de los objetos presentes en la imagen corregida (coberturas de la Tierra) respecto a la imagen original, mejorando los resultados finales del proceso de clasificación digital”. (Cabrera et al. 2011).

Existen diversos métodos para la corrección atmosférica y cada uno de ellos presenta ofrece mejores resultados de acuerdo al tipo imagen con que se cuenta. según el USGS, Los productos estándar Landsat 8 LDCM, suministrados por el USGS EROS CENTER consisten en una serie cuantificada, calibrada y escalada de niveles digitales ND, los cuales representan los datos de una imagen multiespectral adquirida por ambos sensores: *OLI Operational Land Imagen* y el *TIRS Thermal Infrared Sensor*.

De acuerdo con Ariza, (2013). “Los datos del sensor OLI pueden ser convertidos a valores de reflectancia aparente (TOA) en el techo de la atmosfera, usando para ello los coeficientes de reflectancia reescalados, suministrados en el archivo de metadatos MTL (ver metadato de la imagen). La siguiente ecuación es usada para convertir los ND niveles digitales a valores de reflectancia para los obtenidos por el sensor OLI:

$$\rho_{\lambda} = M_p * Q_{cal} + A_p$$

Donde:

$P\lambda'$  = Es el valor de reflectancia planetaria, sin corrección por ángulo solar. Note que  $P\lambda'$  no contiene una corrección por el ángulo solar.

$M\rho$  = Es el factor multiplicativo de escalado específico por banda obtenido del metadato (REFLECTANCE\_MULT\_BAND\_x, donde x es el número de la banda).

$A\rho$  = Es el factor aditivo de escalado específico por banda obtenido del metadato (REFLECTANCE\_ADD\_BAND\_x, donde x es el número de la banda).

$Q_{cal}$  = Es el producto estándar cuantificado y calibrado para valores de píxel (DN). Este valor se refiere a cada una de las bandas de la imagen.

El cálculo de la reflectancia real de una cubierta captada por un sensor espacial está condicionado por el comportamiento de la atmósfera, así como del ángulo de observación.

De esta manera, la reflectancia en el techo de la atmósfera TOA con una corrección para el ángulo solar es entonces:

$$\rho\lambda = \rho\lambda' / \cos(\theta_{sz}) = \rho\lambda' / \sin(\theta_{se})$$

Donde

$P\lambda$  = Es el valor reflectancia planetaria o en el techo de la atmósfera TOA, con corrección por ángulo solar.

$\theta_{se}$  = Es el ángulo de elevación solar. El ángulo de elevación solar del centro de la escena es provisto en el metadato de la imagen (SUN\_ELEVATION).

$\theta_{sz}$  = Es el ángulo solar zenith local.

Para más exactitud en el cálculo de la reflectancia, por pixel ángulo solar puede ser usado instante del ángulo solar del centro de la escena, pero por pixel el ángulo zenith solar no son suministrados con los productos Landsat 8.

De este modo la ecuación general de conversión a reflectancia, incluyendo la corrección por ángulo solar quedaría de la siguiente manera:

$$\rho_{\lambda} = (M_p * Q_{cal} + A_p) / \sin(\theta_{SE})$$

Donde:

$\rho_{\lambda}$  = Es el valor de reflectancia planetaria, sin corrección por ángulo solar. Note que  $\rho_{\lambda}$  no contiene una corrección por el ángulo solar.

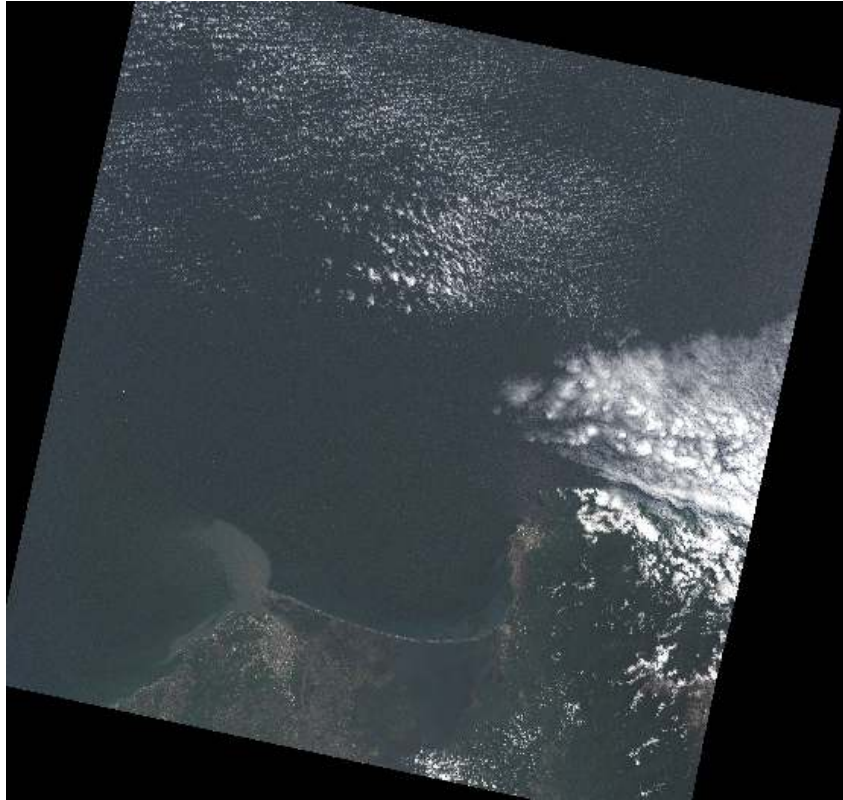
$M_p$  = Es el factor multiplicativo de escalado específico por banda obtenido del metadato (REFLECTANCE\_MULT\_BAND\_x, donde x es el número de la banda).

$A_p$  = Es el factor aditivo de escalado específico por banda obtenido del metadato (REFLECTANCE\_ADD\_BAND\_x, donde x es el número de la banda).

$Q_{cal}$  = Es el producto estándar cuantificado y calibrado para valores de pixel (DN). Este valor se refiere a cada una de las bandas de la imagen.

$\theta_{se}$  = Es el ángulo de elevación solar. El ángulo de elevación solar del centro de la escena es provisto en el metadato de la imagen (SUN\_ELEVATION)".





. Figura 67. Imagen Landsat-8 después de aplicársele corrección atmosférica. Fuente: Elaboración propia, 2016.

Ya una vez realizada la conversión de los niveles digitales a los valores de reflectancia, se reduce la resolución radiométrica en 8 bits es decir a 255 tonos de grises, esto facilita la distinción de firmas espectrales para el ojo humano en vez de 16 bits (65536 tonos de grises). Para agilizar el procesamiento y reducir el consumo de recurso informático se realiza un corte sobre el área de interés donde se encuentra la zona de estudio. La cual se puede ver en la figura 68.

Basado en lo anterior, se hace énfasis en la gran importancia de tener claro el concepto de transformar los ND a reflectividad aparente, mas no confundirlos con corrección atmosférica. De acuerdo con [A. Parra, \(2017\)](#) define que “Para el cálculo

de la reflectividad espectral de la superficie, además de los datos de contenido incluidos en el metadato de la imagen, también es necesario contar con la siguiente información:

- Radiancia atmosférica debida a la dispersión en dirección al sensor, para cada banda.
- Irradiancia solar dispersada por la atmosfera hacia la superficie (descendente), para cada banda.
- Transmisividad de la atmosfera en la trayectoria Sol-Superficie (descendente) para cada banda.
- Transmisividad de la atmosfera en la trayectoria superficie-sensor (ascendente) para cada banda.

Como estos parámetros son normalmente desconocidos o difícil de obtener, pueden generarse a partir de modelos físicos de transferencia radiativa (MTR), que suelen basarse en una serie de atmosfera estándar: visibilidad atmosférica, modelo climático, modelos aerosoles, etc. La exactitud de estos modelos dependerá de la solidez de las asunciones que se realicen y de la similitud entre los perfiles teóricos y las condiciones concretas de la atmosfera cuando se toma la imagen.

Los MTR con atmosfera estándar más conocidos son el SMAC, 6S y MODTRAN4.

El más usado es el MODTRAN4 para la corrección atmosférica sobre una imagen y esta implementado en una serie de programas: ATCOR (*Atmospheric Correction and Haze reduction*), ATREM (*Atmospheric removal*), ACORN (*Atmospheric Correction Now*) y FLAASH (*Fast Line-Of-Sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes*). “

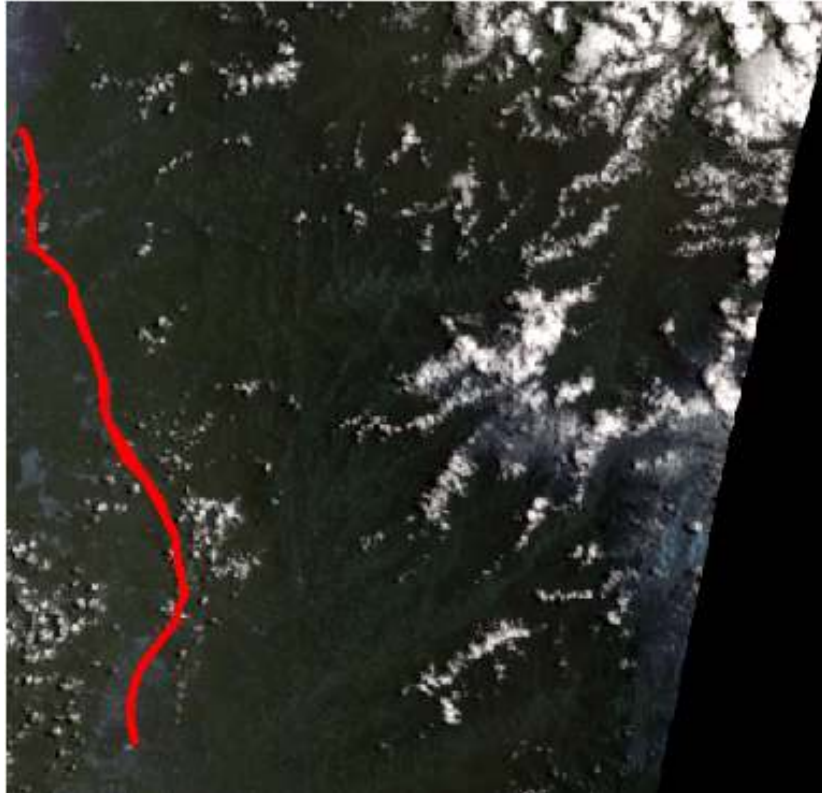


Figura 68. Imagen Landsat Recortada sobre el área de interés. Fuente: Elaboración propia, 2016.

### **Clasificación de coberturas**

Como parte del proceso para una correcta modelación hidrológica es necesario contar con una capa de coberturas adecuada para aplicaciones de parámetros matemáticos como el número de curva de la *Soil Conservation Service*.

La fase de la clasificación de acuerdo a la definición del [L. Melo y M. Camacho, \(2005\)](#) incluye la “descripción individual de las superficies delineadas por el análisis, su arreglo en un sistema adecuado y codificación.

La clasificación establece la identidad de las superficies u objetos delineados por la interpretación. En el caso de objetos directamente reconocibles, la clasificación

puede ser hecha mediante la naturaleza misma de los objetos (casas, carreteras, canales, ríos, arboles)”

Las coberturas se harán de acuerdo al *Corine Land Cover* primer nivel. Esta metodología nació en Europa y es un sistema de clasificación para inventario de las coberturas de la tierra, como soporte a la toma de decisiones en política relacionadas en el medio ambiente y el ordenamiento territorial. Actualmente, aplica el *Corine Land Cover* en su versión 2000 sobre la totalidad de los países que hacen parte la unión europea.

Para el presente estudio se clasificó en los siguientes niveles para que sean compatibles con los parámetros del número de curva de la SCS:

Zonas urbanas

Agua

Cultivos y/o pastoreo

Bosque

Nubes

Para la elaboración del proceso de clasificación, se empleó el software ecognition mediante técnicas de segmentación por objetos y la selección de clases se hizo de forma supervisada. Adicionalmente se generó el índice espectral NDVI (Índice de vegetación Normalizada) y se apoyó en los valores espectrales de cada una de las bandas.

$$NDVI = \frac{NIR - rojo}{NIR + rojo}$$

El proceso inicia segmentando la imagen Landsat- 8 empleando todas sus bandas, la importancia de esta segmentación radica en darle mayor peso a la banda del

infrarojo cercano debido a que es el que está relacionado con el estrés hídrico y contenido de clorofila. (Chuvieco, 1996; Uddin, 2002; L. Melo y M. Camacho, 2005); La segmentación arroja el siguiente resultado:

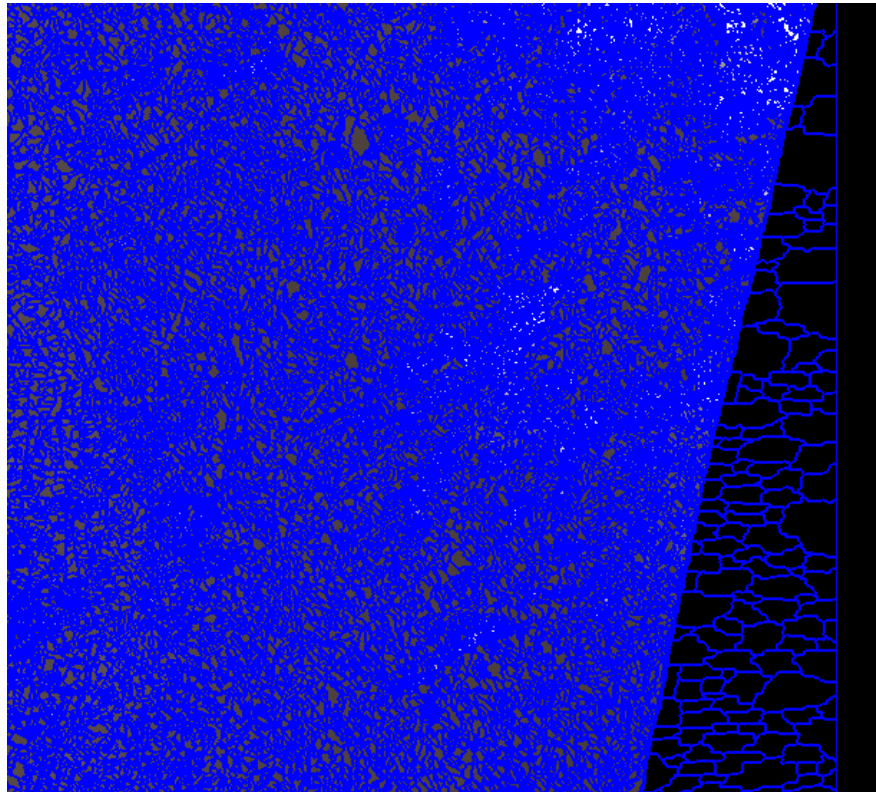


Figura 69. Segmentación de la imagen Landsat-8. Fuente: Elaboración propia, 2016.

Como es una clasificación de tipo supervisada, se debe seleccionar las muestras de ensayo de las coberturas a determinar y evaluar el comportamiento de su firma espectral. A medida que se selecciona más muestras de una misma clase de superficie, el comportamiento de la firma espectral es similar y varía muy poco, esto quiere decir que se está seleccionando muestras homogéneas y lo que hace el algoritmo es reconocer esas firmas, para que luego, al ejecutarse sobre toda la imagen, los objetos segmentados que cumplan con dicho comportamiento espectral se clasifiquen como la cobertura asignada.

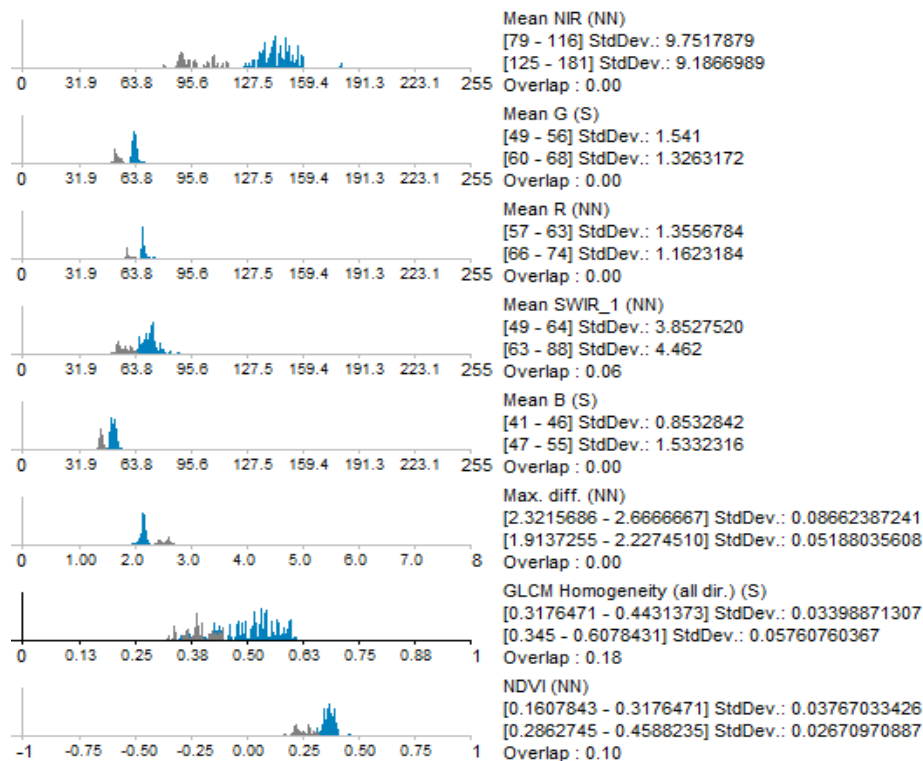


Figura 70. Imagen de comparación de valores espectrales para la cobertura de bosques (gris) y cultivos (azul) generado en el software ecognition. Fuente: Elaboración propia, 2016.

Como todo resultado, se debe hacer una minuciosa verificación de la imagen para corroborar que en efecto el algoritmo hizo el proceso de forma correcta. En ocasiones, cuando los resultados varían en una zona especial ya sea por efecto de las sombras o de alguna anomalía de los valores radiométricos de la imagen, se debe emplear métodos manuales. Finalmente, se debe gestionar campañas de salida de campo para verificar que las coberturas presentes en la zona coincidan con la imagen clasificada en oficina. Por cuestiones de tiempo este proceso fue omitido en el presente estudio.

No obstante como menciona Parra, (2017) existen métodos donde permite hacer verificación en oficina empleando datos de la misma imagen. En términos generales, el usuario debe tener la capacidad de evaluar los valores clasificados si



corresponden al objetivo o no. Para ello se aplica diferentes métodos estadísticos en función de la cantidad de muestras para ejecutar el algoritmo para determinar su cobertura y cuyo error se expresa en matrices usualmente conocidas como matrices de confusión. Por cuestiones de tiempo. Este proceso no se empleó en el presente estudio.

El resultado de la clasificación supervisada sobre la imagen es el siguiente:

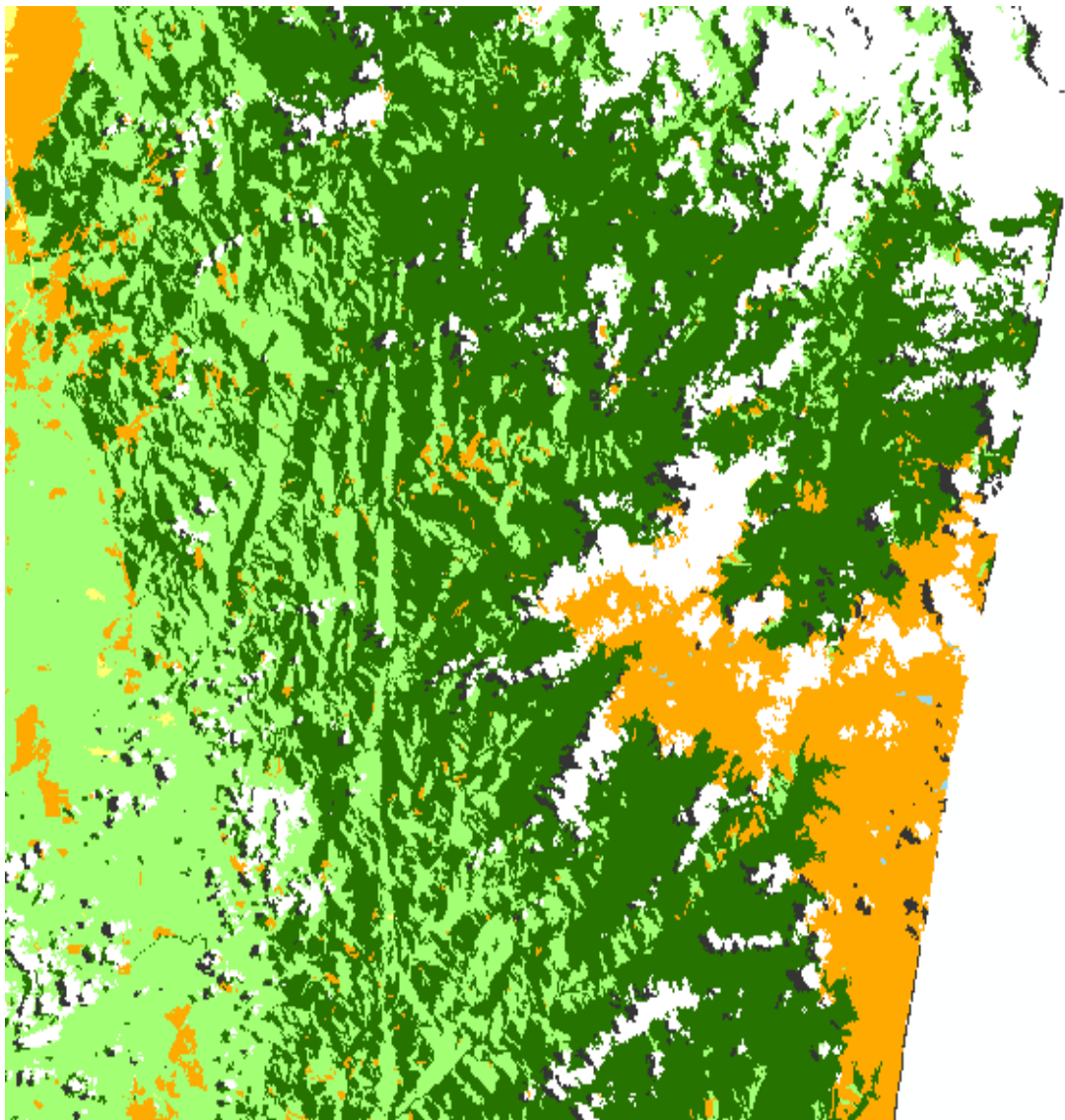


Figura 71. Imagen de clasificación de coberturas sobre la zona de interés. Fuente: Elaboración propia, 2016.

## NUMERO DE CURVA

Continuando con la metodología del [INVIAS, \(2009\)](#) “se puede emplear el Método del número de curva CN del SCS para estimar abstracciones de la precipitación.

El Soil Conservation Service de los Estados Unidos de América, SCS, desarrolló un método denominado número de curva de escorrentía CN, para calcular las abstracciones de una tormenta, las cuales incluyen la intercepción, la detención superficial y la infiltración propiamente dicha.

En este método, la profundidad de escorrentía (es decir, la profundidad efectiva de precipitación) es una función de la profundidad total de precipitación y de un parámetro de abstracción referido al número de curva de escorrentía, denominado número de curva o CN. El número de curva varía en un rango de 1 a 100, existiendo una función de las siguientes propiedades productoras de escorrentía de la hoya hidrográfica: (1) tipo de suelo hidrológico, (2) utilización y tratamiento del suelo, (3) condiciones de la superficie del terreno, y (4) condición de humedad antecedente del suelo.

Los complejos de cubierta hidrológica del suelo describen una combinación específica de los grupos de suelos hidrológicos, el uso y el tratamiento de la tierra, la condición hidrológica superficial y las condiciones de humedad antecedente. Todos estos factores tienen un comportamiento directo sobre la cantidad de escorrentía producida por una hoya hidrográfica. El grupo hidrológico de suelos describe el tipo de suelo. El uso y el tratamiento del suelo describen el tipo y la condición de la cubierta vegetal. La condición hidrológica se refiere a la capacidad de la superficie de la hoya hidrográfica para aumentar o impedir la escorrentía directa. La condición de humedad antecedente tiene en cuenta la historia reciente de la precipitación y, consecuentemente, es una medida de la cantidad almacenada por la hoya.



Los grupos hidrológicos en que se pueden dividir los suelos son utilizados en el planteamiento de cuencas para la estimación de la escorrentía superficial a partir de la precipitación. Las propiedades de los suelos “desnudos”, luego de un humedecimiento prolongado, que son consideradas para estimar la tasa mínima de infiltración, son: profundidad del nivel freático en época de invierno, infiltración y permeabilidad del suelo luego de un humedecimiento prolongado, y la profundidad hasta el estrato de permeabilidad muy baja. La influencia de la cobertura vegetal es tratada independientemente.

Los suelos han sido clasificados en cuatro grupos A, B, C, y D, de acuerdo con el potencial de escurrimiento.

A. (Bajo potencial de escorrentía). Suelos que tienen alta tasa de infiltración incluso cuando estén muy húmedos. Consisten en arenas o gravas profundas, bien a excesivamente drenadas. Estos suelos tienen una alta tasa de transmisión de agua.

B. (Moderadamente bajo potencial de escorrentía). Suelos con tasa de infiltración moderada cuando están muy húmedos. Suelos moderadamente profundos a profundos, moderadamente bien drenados a bien drenados, suelos con texturas moderadamente finas a moderadamente gruesas, y permeabilidad moderadamente lenta a moderadamente rápida. Son suelos con tasas de transmisión de agua moderadas.

C. (Moderadamente alto potencial de escorrentía). Suelos con infiltración lenta cuando están muy húmedos. Consisten en suelos con un estrato que impide el movimiento del agua hacia abajo; suelos de texturas moderadamente finas a finas; suelos con infiltración lenta debido a sales o álcalis o suelos con niveles freáticos moderados. Esos suelos pueden ser pobremente drenados o bien a

moderadamente bien drenados, con estratos de permeabilidad lenta a muy lenta a poca profundidad (50-100cm).

D. (Alto potencial de escorrentía). Suelos con infiltración muy lenta cuando están muy húmedos. Consisten en suelos arcillosos con alto potencial de expansión; suelos con nivel freático alto permanente; suelos con estrato arcilloso superficial; suelos con infiltración muy lenta debido a sales o álcalis y suelos poco profundos sobre material casi impermeable. Estos suelos tienen una tasa de transmisión de agua muy lenta.”

Actualmente están en uso tablas de número de curva de escorrentía CN para varias coberturas hidrológicas. Sin embargo, se puede emplear programas informáticos para el cálculo del número de curva. Para el presente estudio, se empleó el software libre HEC-HMS del cuerpo de ingenieros de estados unidos.

Para ello se debe contar con los dos insumos principales: la capa de coberturas de uso de suelo (la cual se generó s en pasos anteriores por medio de métodos de clasificación) y la capa de tipos de suelos existente y asignarle su respectivo código de grupo hidrológico, actualmente esta capa está disponible a una escala 1:100.000 en el servicio geológico de Colombia. No obstante, lo ideal es generar campañas de toma de muestras, realizar su análisis y con los resultados generar un mapa por medio de métodos geoestadísticos, de tal forma que se pueda localizar las áreas con determinado tipo de suelo, pero para efectos del estudio se usó directamente esta capa para poder ejecutar las modelaciones.

Una vez definidos estos insumos se corrió el modelo y se obtuvo un mapa de Números de curva de acuerdo a la Soil Conservation Service, y que se observa en la siguiente figura:

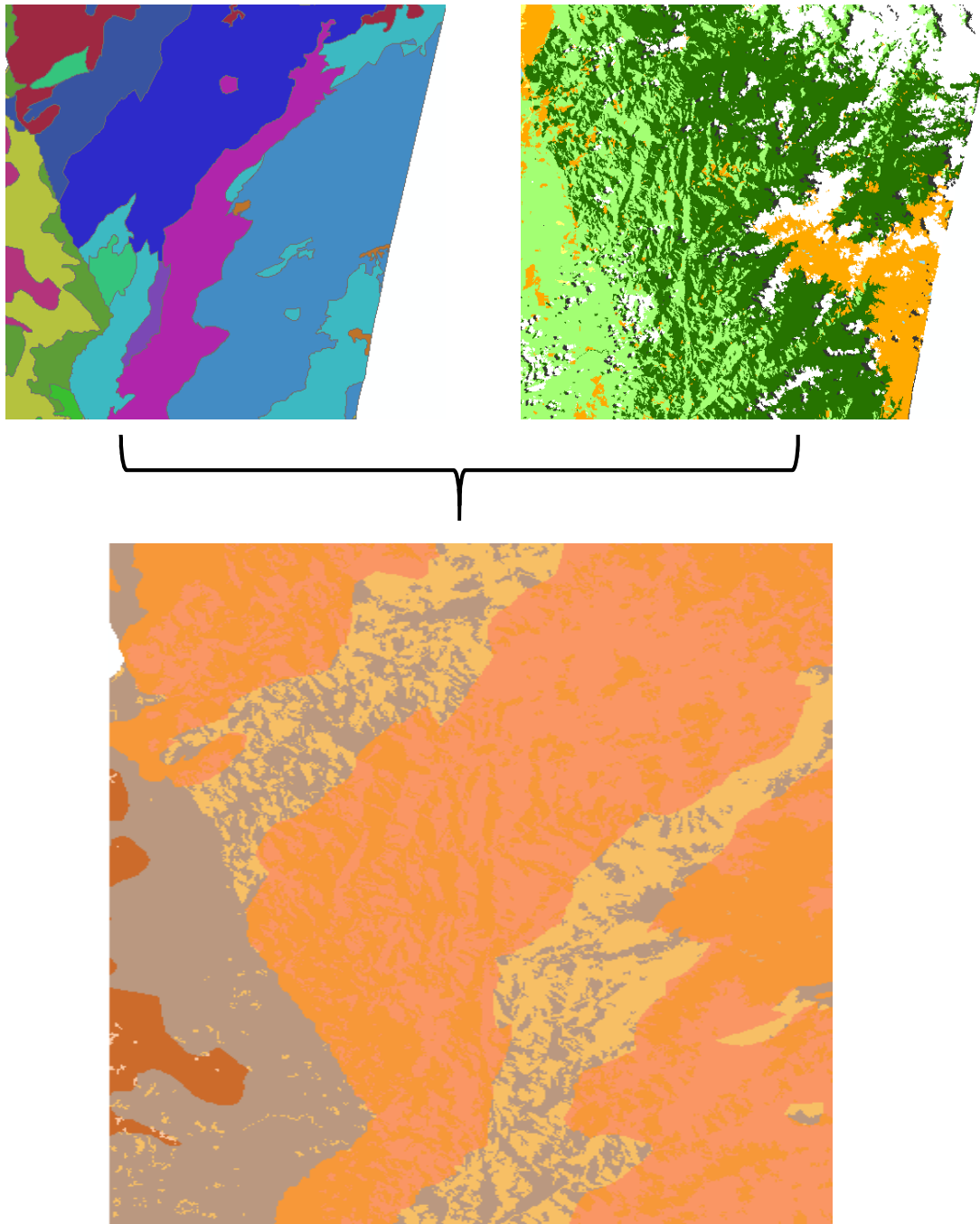


Figura 72. Imagen de Numero de curva después de procesar imagen de Suelos (izq.) y coberturas (der.).Fuente: Elaboración propia, 2016.

Como el interés es conocer el número de curva general de la cuenca de estudio, se ejecuta el cálculo aplicando el método de la sumatoria de la ponderación de los

datos de cada una de las áreas con su respectivo número de curva, multiplicado por su área y dividido sobre el área total de la cuenca.

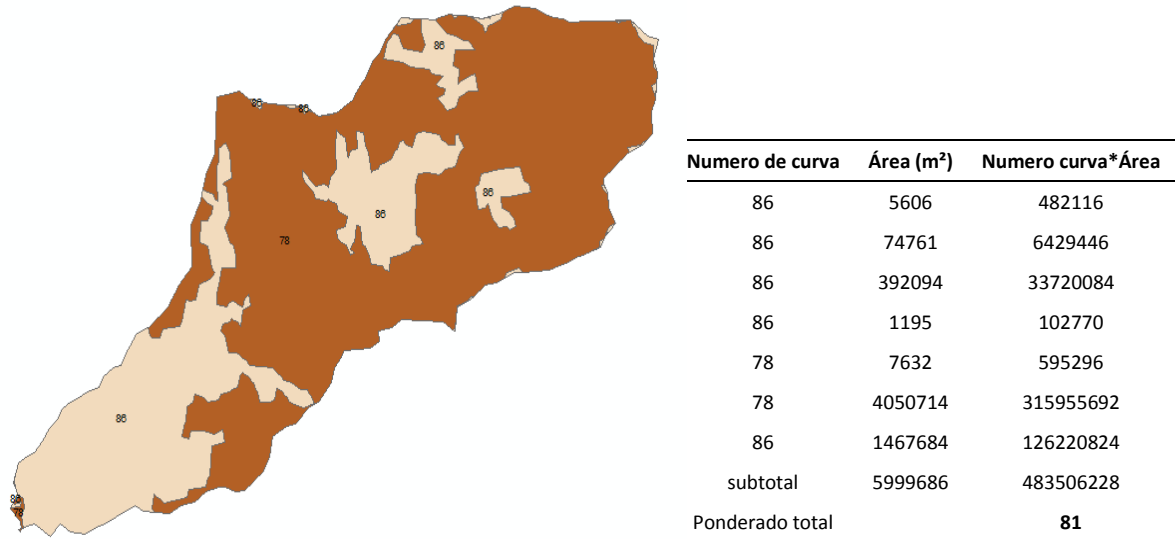


Figura 73. Imagen de la cuenca de número de curva con sus respectivas áreas (izq.) y tabla del número de curva de la cuenca ponderado (der.) Fuente: Elaboración propia, 2016.

No se puede olvidar que también se debe calcular la precipitación de diseño sobre la cuenca de interés. Por lo que se debe definir las áreas de influencia de cada una de la estaciones por medio del método de los polígonos de thiessen. “Este método consiste en unir los puntos de la ubicación de las estaciones entre sí, trazando las mediatrices de los segmento de unión. Las intersecciones de estas mediatrices determinan una serie de polígonos en un espacio bidimensional alrededor de un conjunto de puntos de control, de manera que el perímetro de los polígonos generados sea equidistante a los puntos vecinos y designan su área de influencia” (Konecny, 2014; ESRI, 2016).

Una vez definido los polígonos se ubica la cuenca y se verifica si se presenta algún tipo de intersección con diferentes áreas de influencia. En este caso, al ser positiva dicha afirmación, se empleó el método de la sumatoria de la ponderación de los

datos del hietograma para cada una de las áreas de influencia correspondiente a una estación, multiplicado por su área y dividido sobre el área total de la cuenca.

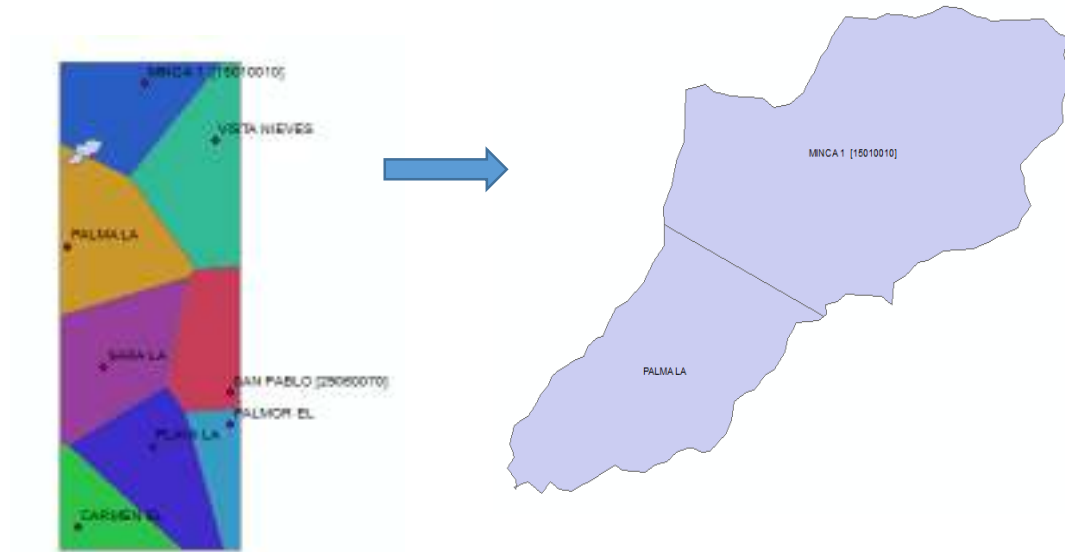


Figura 74. Imagen del área de influencia para cada una de las estaciones por medio del método de polígonos de Thiessen y área de la cuenca. Fuente: Elaboración propia, 2016.

Los resultados de la ponderación de la precipitación sobre la cuenca se encuentran en los anexos.

#### 7.3.4.4. MODELACIÓN HIDROLÓGICA

La modelación hidrológica permite obtener los caudales máximos de escorrentía y sus tiempos pico de una cuenca o subcuencas sobre un área de interés. Para ello se debe contar con los principales insumos que son los parámetros morfométricos de la cuenca, el hietograma de diseño proyectado a 100 años, tiempo de retardo y el número de curva. Todo esto calculado en pasos anteriores.

Para esta modelación se empleó el software HEC-HMS del cuerpo de ingenieros de los estados unidos y el cual es totalmente gratuito.

La secuencia de modelación inicia con los datos de la cuenca, en el que se debe ingresar los principales parámetros como el área, número de curva de la cuenca y tiempo de retardo, además se debe indicar el método de transformación y de pérdidas. En este caso, se había definido que se usaría el método de la Soil Conservation Service. Finalmente se debe ingresar los datos del hidrograma de diseño para una precipitación durante 24 horas y un periodo de retorno de 100 años.

Una vez ingresados correctamente los datos y corriendo el modelo se obtiene el siguiente resultado:

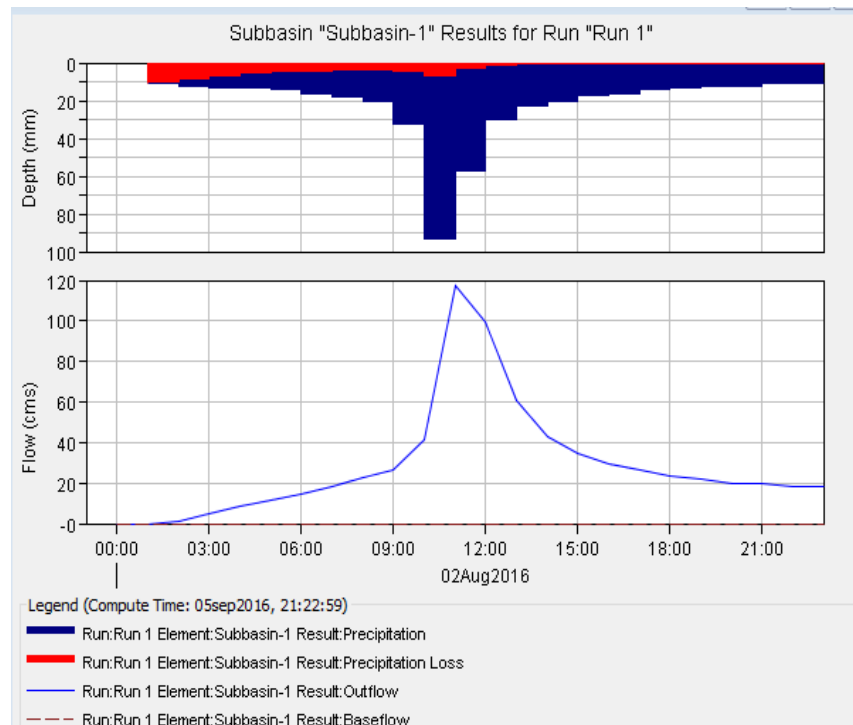


Figura 75. Resultados de la modelación de abstracción en HEC-HMS. Fuente: Elaboración propia, 2016.

De acuerdo al hidrograma, el máximo caudal durante 24 horas para un periodo de retorno de 100 años es de 117.4 m<sup>3</sup>/seg. Este es uno de los datos insumo para la modelación hidráulica.

Aunque el proceso de la modelación hidrológica conlleva el uso de varios tipos de información, es innegable la utilidad de las imágenes aéreas, satelitales y modelos de elevación digital que contribuyen al cálculo de elementos de interés del estudio. Para los modelos de elevación de mediana resolución provenientes de sensores tipo radar, se destaca la detección de líneas de flujo, las cuencas medianas y grandes que pueden ser delimitadas para calcular sus parámetros físicos lo que amplía el espectro de conocimiento del terreno, información que es de gran utilidad para fines de hidrología. Algo que no es posible empleando medios tradicionales de topografía por ser áreas muy de extensas (de km<sup>2</sup>) y de muy difícil acceso.

Por otra parte, los sensores pasivos brinda la posibilidad de extraer las clases de cobertura de zonas de forma actualizada para el cálculo de variables hidrológicas, en comparación con la aplicación de información cartográfica de cobertura proveniente de fuentes secundarias, las cuales generalmente, presentan altos tiempos de desactualización, traduciéndose alto grado de incertidumbre a la hora de hacer las operaciones. Además, esta información se complementa con otros tipos de capas ya existentes como las de tipo suelo y precipitación, para calcular las abstracciones de una tormenta, las cuales incluyen la intercepción, la detención superficial y la infiltración propiamente dicha. Todo esto da como resultado modelaciones con mejor ajuste y mayor confiabilidad para los diferentes propósitos de diseño de infraestructura.

#### 7.3.4.5. MODELACIÓN HIDRAULICA

La hidráulica fluvial trata de las intervenciones humanas en los ríos para su adecuación al aprovechamiento de los recursos o a la reducción de los riesgos de daño. Para comprender esta hidráulica se debe tener conocimientos de hidráulica, hidrología y de obras hidráulicas.

Torres y González, (2010) menciona que “Para investigaciones de hidráulica de fluvial se demuestra la importancia de aplicar el modelo de simulación hidráulica para la emisión de pronósticos hidrológicos de inundaciones en tiempo real, permitiendo determinar la respuesta del cauce del río ante tan magnitud de volumen de agua. El modelo se basa en ecuaciones diferenciales determinísticas, que al ser solucionadas en la estructura del modelo de simulación hidráulica, permiten pronosticar la dinámica de los niveles de agua en los eventos hidrometeorológicos extremos de inundación, definiendo las cotas de inundación a través de perfiles transversales, simulando de manera aproximada el comportamiento de la dinámica del recurso hídrico y del cauce con características de: Secciones mojadas variables con cualquier geometría a lo largo del cauce, diferentes tipos de rugosidad para ciertas partes del perfil mojado, distintas profundidades del agua y con caudal variable a lo largo del cauce en condiciones de régimen de flujo sub-crítico o súper-crítico con efectos hidráulicos debido a obstáculos transversales naturales o artificiales en el cauce.”

El software IRIC (International River Interface Cooperative) es un software gratuito que modela las variaciones del lecho de río, inundaciones entre otros análisis combinando la funcionalidad de otros softwares como el MD\_SWMS de los USGS (U.S Geological survey) y RIC\_Nays desarrollado por la fundación de del centro de investigación de prevención de desastres Hokkaido, Japón.



En el presente estudio se modela la socavación e inundación del cauce al que se le realizó la modelación hidrológica. Se emplearon las herramientas Nays2DH y Nays2Dflood pertenecientes al IRIC.

La secuencia de modelación inicia ingresando una grilla de los puntos de elevación pertenecientes al terreno, el objeto es conocer el comportamiento de la socavación e inundación de una línea de escorrentía totalmente libre obstáculos como casas, árboles y demás objetos, por lo tanto, se procede en la filtración de estos elementos en la nube de puntos LiDAR y se genera el modelo de superficie de terreno. La ventaja del IRIC es que soporta una considerable cantidad de datos LiDAR. Sin embargo, hay que realizar transformación para pasar de la extensión .LAS a formato .TPO. en sentido contrario, la desventaja radica en que al cargar grandes extensiones manteniendo la misma densidad de puntos, hace que sature la capacidad del procesador del equipo. Por lo que es necesario reducirla y así poder ejecutar los modelos.

Una vez cargado el modelo se debe definir la grilla la cual va a ser el espacio modelo y donde se copiará los atributos de elevación directamente del terreno. Así mismo, se debe ingresar los parámetros de las celdas de la grilla como tipo de suelo, definir obstáculos, condiciones de rugosidad, zonas de ingreso de flujo. Y posteriormente definir las condiciones de cálculo del modelo, en esta etapa se ingresa el hidrograma de diseño anteriormente calculado en el capítulo de hidrología,

El software IRIC contiene varios modelos computacionales de acuerdo al fenómeno que se desea estudiar. Para el presente estudio, se usarán los modelos NaysDH y NaysFlood. El primero es un simulador matemático en 2D del flujo, transporte de sedimentos, cambios morfológicos del lecho del río y bancos de arena. El segundo es un simulador de flujo de tipo estable e inestable para determinar las áreas de inundaciones en un río.

De acuerdo con los parámetros de entrada (especialmente el hidrograma de diseño) se alimenta ambos modelos computacionales y se ejecutan arrojando las siguientes soluciones.

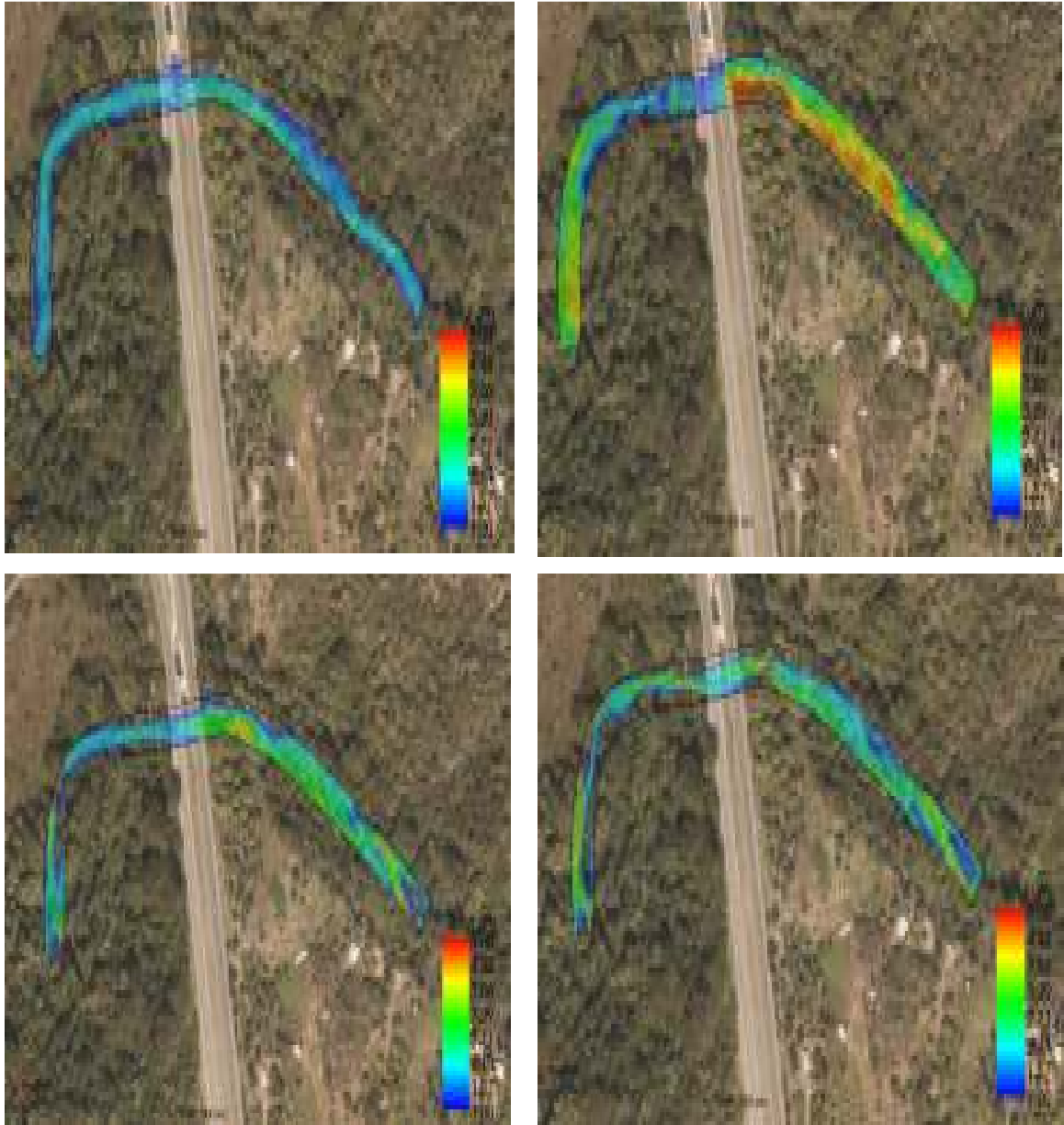


Figura 76. Resultado modelación de la socavación con Nays2DH. Fuente: Elaboración propia, 2016.

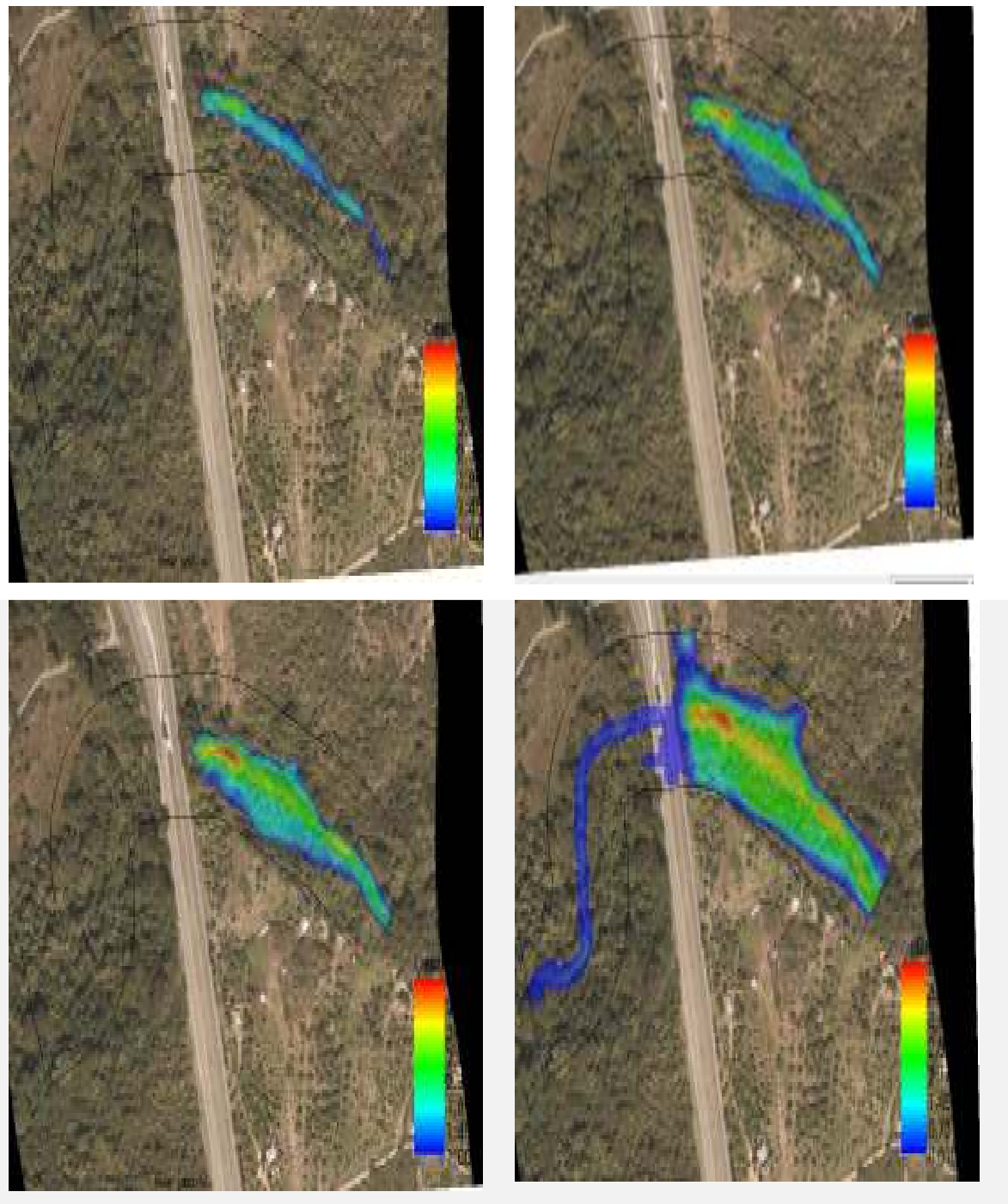


Figura 77. Resultado modelación de la inundación con NaysFlood, obsérvese el represamiento del flujo en el puente de la doble calzada. Fuente: Elaboración propia, 2016.

Analizando los resultados, se identifica que la socavación a lo largo del cauce principal del arroyo presenta cotas máximas de 4 metros. Esto es producto del supuesto de un suelo de tipo limoarcilloso con baja compactación, de material uniforme, susceptible a la socavación y con cero lamina de flujo. Por lo tanto, si se quiere elaborar un modelo más ajustado a la realidad se tiene que realizar estudios geotécnicos para determinar las propiedades del suelo sobre el arroyo o zona de interés. Con respecto a la inundación, se tiene un comportamiento interesante y es la acumulación del flujo a la altura del viaducto de la doble calzada, esto es un indicador de que existe una represa virtual sobre el modelo de terreno, por lo tanto, no se hizo adecuadamente la filtración de la nube de puntos. Dando como resultado, modelos que no refleja la realidad del terreno. Sin embargo, para fines didácticos, es un buen ejemplo de los riesgos y consecuencias en la simulación de flujos sobre un falso terreno. Ahora bien, este tipo de cálculo y posterior análisis empleando topografía convencional es posible, pero su diferencia radica más que todo en el detalle del terreno. Los sensores remotos activos como el LiDAR para la modelación hidráulica, son un insumo esencial porque representa de forma mucho más precisa la topografía del sitio de interés por la densidad de puntos. Por lo que se tiene más detalles de la morfología del terreno y que a la hora de modelar el flujo sobre este, es más probable que se acerque a la realidad.

#### **7.3.4.6. RESULTADOS Y CONCLUSIONES**

Aunque el proceso de la modelación hidrológica conlleva el uso de varios tipos de información, es innegable la utilidad de las imágenes aéreas, satelitales y modelos de elevación digital que contribuyen al cálculo de elementos de interés del estudio. Para los modelos de elevación de terreno (DTM) de mediana resolución provenientes de sensores tipo radar, se destaca la detección de líneas de flujo, las cuencas medianas y grandes que pueden ser delimitadas para calcular sus parámetros físicos lo que amplía el espectro de conocimiento del terreno, información que es de gran utilidad para fines de hidrología. Algo que no es posible empleando medios tradicionales de topografía por ser áreas muy de extensas (de km<sup>2</sup>) y de muy difícil acceso.

Por otra parte, los sensores pasivos brinda la posibilidad de extraer las clases de cobertura de zonas de forma actualizada para el cálculo de variables hidrológicas, en comparación con la aplicación de información cartográfica de cobertura proveniente de fuentes secundarias, las cuales generalmente, presentan altos tiempos de desactualización, traduciéndose en alto grado de incertidumbre a la hora de hacer las operaciones. Además, esta información se complementa con otros tipos de capas ya existentes como las de suelo y precipitación, para calcular las abstracciones de una tormenta, donde se incluye la intercepción, la detención superficial y la infiltración propiamente dicha. Todo esto da como resultado modelaciones con mejor ajuste y mayor confiabilidad para los diferentes propósitos de diseño de infraestructura.

Analizando los resultados, se identifica que la socavación a lo largo del cauce principal del arroyo presenta cotas máximas de 4 metros. Partiendo de un supuesto suelo de tipo limoarcilloso con baja compresibilidad, de material uniforme, susceptible a la socavación y con cero lamina de flujo. Por lo tanto, si se quiere

elaborar un modelo más ajustado a la realidad se tiene que realizar estudios geotécnicos para determinar las propiedades del suelo sobre el arroyo o zona de interés. Con respecto a la inundación, se tiene un comportamiento interesante y es la acumulación del flujo a la altura del viaducto de la doble calzada, esto es un indicador de que existe una represa virtual sobre el modelo de terreno, por lo tanto, no se hizo adecuadamente la filtración de la nube de puntos. Arrojarlo como resultado, un modelo que no refleja la realidad del terreno. Sin embargo, para fines didácticos, es un buen ejemplo de los riesgos y consecuencias en la simulación de flujos sobre un falso territorio. Ahora bien, este tipo de cálculo y posterior análisis empleando topografía convencional es posible, pero su diferencia radica más que todo en el detalle del terreno. Los sensores remotos activos como el LiDAR para la modelación hidráulica, son un insumo esencial porque representa de forma mucho más precisa la topografía del sitio de interés por la densidad de puntos. Por lo que se tiene más detalles de la morfología del terreno y que a la hora de modelar el flujo sobre este, es más probable que se acerque a la realidad.

### **7.3.5. MODELACION 3D**

#### **7.3.5.1. MODELO 3D A PARTIR DE SUBPRODUCTOS**

Actualmente la modelación 3d viene tomando una relevancia en el campo de la ingeniería, porque permite visualizar los diseños y el terreno de una forma mucho más práctica para aquellas personas no familiarizadas en la interpretación de planos. Además, los diseñadores pueden visualizar el desarrollo de las futuras construcciones mediante la integración de los diseños de todas las disciplinas involucradas empleando sistemas de simulación más conocidos como BIM (Building Information Models). De acuerdo con [Thomson y Boehm, \(2015\)](#) en la actualidad, “la principal técnica para capturar datos 3d alrededor de un ambiente urbano es emplear scanner laser terrestre el cual está a nivel de calle donde la captura de los detalles es impresionante, siendo mucho más efectivo que un levantamiento convencional mediante el uso de equipos como la estación total. En cambio, el scanner laser por plataforma aérea brinda más detalle acerca del terreno y es útil para la detección de los edificios con su atributo de altura. Los modelos BIM han tenido una gran aceptación sobre la comunidad de arquitectura, ingeniería, construcción y operación por permitir el mejoramiento en la gestión de la información, además de brindar los modelos 3d con componentes paramétricos, es decir, contiene información geométrica y semántica”.

Un impacto importante en la generación de los modelos 3d y usados en el BIM es que representa de forma muy fiel el resultado final de un futuro diseño. Donde se reducen sustancialmente los errores de construcción como la interferencia de tuberías, además de servir como insumo para alimentar otros tipos de simulación como el consumo energético y aprovechamiento de agua en edificios.

Para el presente estudio, se pretende hacer una modelación 3d del terreno levantado con el LiDAR, usando como insumo el modelo digital de terreno DTM y la

fotografía aérea empleando el software infraworks de Autodesk. Además, se pretende incluir las viviendas con sus respectivas alturas extraídas directamente de la nube de puntos de acuerdo a la técnica de procesamiento de imágenes ya ejecutadas anteriormente, drenajes también extraídos en pasos anteriores y torres de energía detectadas de forma manual. La ventaja del modelo es que se puede incluir cuantas capas se deseen de acuerdo al tipo de información que se tenga.

El software infraworks de Autodesk permite generar modelos virtuales en 3d de terrenos y está dirigido al sector de la ingeniería. En él es posible generar propuestas a nivel conceptual y de forma rápida de todo tipo de infraestructura como carreteras, ferrocarriles, puentes, tuneles, urbanismo, etc. Igualmente, se puede generar modelos a detalles mediante la integración del software 3dmax para visualización con fotorealismo para presentaciones profesionales (Algo que esta fuera del alcance de este estudio).

Una limitante de la elaboración del modelo es el recurso informático. Naturalmente se necesita un equipo poderoso para que visualice fielmente los detalles de las imágenes manteniendo su resolución original. Desafortunadamente, como no se cuenta con dicho recurso, fue necesario hacer un remuestreo en la resolución espacial de ambas imágenes. Llevando al modelo digital de terreno de 1 metro a 5 metros y la imagen aérea de diez centímetros a dos metros. Otra dificultad, es que no se pudo cargar los arboles de forma individual debido a la gran densidad de puntos algo que el computador no podía procesar y resultaba en saturación del sistema. Ya una vez remuestreadas las imágenes, se carga el modelo de elevación del terreno en el software infraworks y se carga la fotografía área indicando que sea a elevación del modelo de terreno. Este criterio permite ver el modelo 3d. Igualmente se suben al modelo las líneas de drenaje y edificaciones con los atributos de altura.



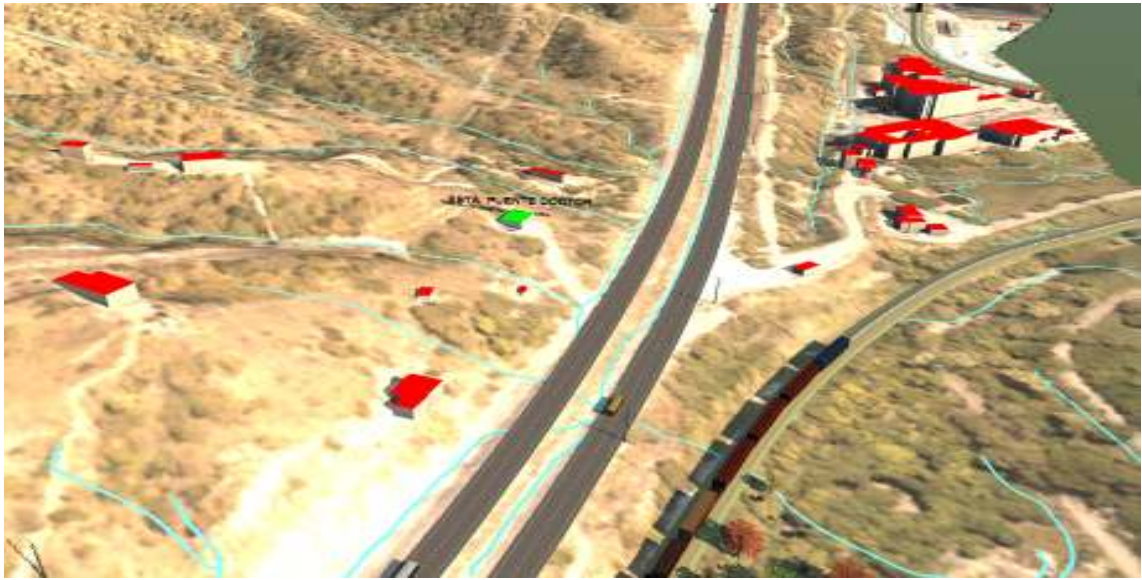


Figura 78. Imagen modelo 3d en Infracworks obsérvese las líneas de drenajes y viviendas en rojo con sus atributos de altura. Fuente: Elaboración propia, 2016.



Figura 79. Imagen modelo 3d en Infracworks obsérvese las líneas de drenajes y viviendas en rojo con sus atributos de altura. Fuente: Elaboración propia, 2016.

Como el interés principal es compartir detalles de la planificación de un trazado de infraestructura de gasoducto con todas las personas involucradas en el proyecto. Los sensores remotos se perfilan como una herramienta útil para lograr este propósito. Los de tipo activo como el LiDAR permiten generar los derivados como el DTM y DSM que representa fielmente las condiciones del terreno y que junto con

la fotografía aérea, desde el punto de vista de la ingeniería, representa una enorme utilidad en el diseño de cualquier obra. Uno de los grandes puntos a favor de esta información, es la elaboración de modelos en 3D, lo que permite visualizar desde cualquier perspectiva, las condiciones del área donde se pretende desarrollar la infraestructura y exportarlas en diferentes formatos como fotografía o video a aquellos individuos que no estén familiarizados o no tengan la capacidad de interpretar planos, lo que reduciría la incertidumbre y contribuye a la mejor toma de decisiones.

### **7.3.5.2. RESULTADOS Y CONCLUSIONES**

La modelación 3d a una escala de detalle alta es viable gracias al empleo de la información proveniente del sensor LiDAR y el ortofotomosaico. Algo que, no es posible representar por medio de levantamientos topográficos tradicionales, especialmente porque la topografía sólo se limita a la información de tipo vectorial con datos X,Y,Z y no contempla la toma de datos radiométricos por medio de sensores ópticos, es decir, la fotografía aérea. Lo que ya de por si es una gran limitante a la hora de representar un terreno a aquellas personas no familiarizadas con planos porque no se tiene información de la cobertura.

## 8. RESULTADOS Y CONCLUSIONES

A continuación se expone, un resumen, los resultados y conclusiones obtenidos con respecto a los objetivos durante el desarrollo del documento. Se adjunta los mapas en ANEXOS.

### 1. MODELO DIGITAL DE ELEVACION, MODELO DIGITAL DE TERRENO Y CLASIFICACION DE NUBE DE PUNTOS LiDAR

Una correcta depuración de los puntos es de gran importancia para una buena representación del terreno. Haciendo un comparativo de los métodos topográficos tradicionales para levantamiento de áreas de territorio con respecto al LiDAR, la diferencia en la cantidad de mediciones disponibles es abrumadora. En el empleo de métodos tradicionales, se elaboran secciones transversales con respecto al eje de diseño de máximo 50 metros de largo en ambos lados, tomando un punto de datos en lo posible cada metro de distancia y las secciones tienen una separación de 20 metros. Si se hace el cálculo para una longitud de 100 metros, la densidad sería de unos 0.05 puntos de medición por metro cuadrado de superficie. El LiDAR usado en el presente estudio, levanta 4 puntos de datos por metro cuadrado de superficie. Y usando la misma relación de distancia longitudinal de los 100 metros y 100 metros de ancho. Se tiene disponible 40.000 puntos de medición. Es decir, 800.000 veces más información del terreno que un levantamiento convencional. Por lo tanto, El gran volumen de puntos LiDAR permite generar una clara visualización de la configuración de la superficie, como su vegetación, viviendas e infraestructura. Algo que con métodos convencionales es imposible a ese nivel debido a la poca disponibilidad de mediciones por área de superficie. Lo que representa una ganancia en el volumen de información disponible. Siendo el DTM el que permite develar aquellos detalles ocultos bajo vegetación densa. Por lo que al generar un modelo de superficie sobre una topografía tradicional, se obtiene como resultado, un terreno con menor grado de precisión en la distribución espacial del relieve

representada. Siendo así, La nube de puntos es el insumo primario para la generación de derivados, los cuales son importantes en la aplicación de diversas áreas de conocimiento como la geología, hidrología e hidráulica. Lo que es prioritario realizar una adecuada filtración de todo dato que esté relacionado con los ruidos y posteriormente ejecutar una clasificación empleando algoritmos automáticos, lo que se traduce en un indiscutible ahorro de tiempo. No obstante, nunca se debe omitir la revisión manual de la clasificación automática. Cuyo propósito es verificar y corregir las zonas donde exista una errónea asignación del tipo de cobertura. Aunque es un proceso un tanto dispendioso y que consume tiempo, es crucial para garantizar una buena calidad de la clasificación final y por lo tanto en la elaboración de sus dos derivados principales, como son el DTM y DSM,

## 2. DETECCION DE VIVIENDAS, AREA ARBUSTIVAS E INDIVIDUALIZACIÓN DE ARBOLES MAYORES A 3 METROS.

Empleando métodos de procesamiento sobre las imágenes, se detectó un total de 1683 unidades de Edificaciones; para las coberturas de zonas arbustivas mayores a 3 metros y clasificadas en 3, 5, 10 y más de 15 metros. Las áreas calculadas fueron de: 112.05 hectáreas para la cobertura de 3 a 5 metros; de 349.35 hectáreas para la cobertura de 5 a 10 metros; de 420.05 hectáreas para la cobertura de 10 a 15 metros; 294.73 hectáreas para la cobertura mayor de 15 metros. Sin exclusión de cultivos como plátano o palma africana. Y para la individualización de árboles se calculó un total de 342.768 unidades. Todo esto en un periodo de ejecución de 10 días (el algoritmo calculaba de forma simultánea las viviendas, zonas mayores a tres metros e individualización de árboles). Aclarando que no se tuvo en cuenta para las edificaciones la distinción de su uso (bodegas, ranchos, fincas, entre otros). La generación de esta información es de suma importancia en la elaboración de alternativas de los trazados de un gasoducto, ya que permite identificar la cantidad de viviendas sobre la zona de estudio, zonas ambientalmente sensibles y cuantificar el aprovechamiento forestal. Lo que contribuye en la toma de decisiones con el

propósito de seleccionar la mejor ruta, de tal forma, reduciendo las zonas de afectación y valorar presupuestalmente el monto aproximado en la adquisición y compra de las propiedades a indemnizar además mejorar los Estudios de Impacto Ambiental EIA

### 3. GEOLOGIA Y GEOMORFOLOGIA

El resultado más importante en la parte geomorfológica es de tipo cualitativo. Donde la aplicación de la metodología RRIM y junto con el cálculo de líneas de escorrentía, Permitió exponer detalles de las geoformas que estaban ocultas a lo largo de los 50 kilómetros, y que analizando los tipos de erosión dan un indicio del tipo de suelo en el terreno. Algo que no es posible de identificar empleando sólo una fotografía aérea o topográfico tradicional ya que no brinda todo el detalle del terreno por su poca densidad de puntos, además de estar limitado a áreas no tan extensas en comparación con el LiDAR. Este insumo se destaca por su importancia en la identificación de las zonas más aptas en función de su geomorfología para la localización de infraestructura. Donde las zonas montañosas con fuerte pendiente, las zonas con considerable cantidad de drenajes, además de su profundidad y forma, los planos de inundación reflejados en el terreno por procesos erosivos, debido a los eventos hidrológicos asociados a la precipitación, representan unas condiciones riesgosas para el trazado y las cuales deben evitarse en lo posible. En contraste con las zonas planas con poca densidad de drenajes, superficiales y poco profundas. Siendo esto apoyado por los índices SPI Y CTI sobre levantamientos donde su utilidad se centra como un insumo para medir el riesgo con respecto a la erosión e inundación (fuera del alcance de este estudio) sobre toda la zona y evaluar los lugares más óptimos para ubicar la futura obra de infraestructura, generar planes de acción para el diseño de obras de mitigación y/o protección con el propósito de garantizar la durabilidad, estabilidad y confiabilidad del gasoducto durante su construcción y puesta en servicio.

#### 4. HIDROLOGÍA E HIDRÁULICA.

El proceso de la modelación hidrológica conlleva el uso de varios tipos de información, es innegable la utilidad de las imágenes aéreas, satelitales y modelos de elevación digital que contribuyen al cálculo de elementos de interés del estudio. Para los modelos de elevación de mediana resolución provenientes de sensores tipo radar, se destaca la detección de líneas de flujo, las cuencas medianas y grandes que pueden ser delimitadas para calcular sus parámetros físicos lo que amplía el espectro de conocimiento del terreno, información que es de gran utilidad para fines de hidrología. Algo que no es posible empleando medios tradicionales de topografía por ser áreas muy de extensas (de km<sup>2</sup>) y de muy difícil acceso. Por otra parte, los sensores pasivos brinda la posibilidad de extraer las clases de cobertura de zonas de forma actualizada para el cálculo de variables hidrológicas, en comparación con la aplicación de información cartográfica de cobertura proveniente de fuentes secundarias, las cuales generalmente, presentan altos tiempos de desactualización, traduciéndose alto grado de incertidumbre a la hora de hacer las operaciones. Además, esta información se complementa con otros tipos de capas ya existentes como las de suelo y precipitación, para calcular las abstracciones de una tormenta, donde se incluyen la intercepción, la detención superficial y la infiltración propiamente dicha. Todo esto da como resultado modelaciones con mejor ajuste y mayor confiabilidad para los diferentes propósitos de diseño de infraestructura. Los sensores remotos activos como el LiDAR para la modelación hidráulica, son un insumo esencial porque representa de forma mucho más precisa la topografía del sitio de interés por la densidad de puntos. Por lo que se tiene más detalles de la morfología del terreno y que a la hora de modelar el flujo sobre este, es más probable que se acerque a la realidad.

## 5. MODELACIÓN 3D

La modelación 3d a una escala de detalle alta es viable gracias al empleo de la información proveniente del sensor LiDAR y el ortofotomosaico. Algo que, no es posible representar por medio de levantamientos topográficos tradicionales, especialmente porque la topografía sólo se limita a la información de tipo vectorial con datos X,Y,Z y no contempla la toma de datos radiométricos por medio de sensores ópticos, es decir, la fotografía aérea. Lo que ya de por si es una gran limitante a la hora de representar un terreno a aquellas personas no familiarizadas con planos porque no se tiene información que represente la cobertura.

## 6. COMPARACIÓN SENSORES REMOTOS CON TOPOGRAFÍA TRADICIONAL

En conclusión, el uso de la tecnología de sensores remotos permite contar con información altamente detallada de la zona de estudio y estimar las áreas de afectación boscosas con alturas mayores a 3 metros, zonas urbanas y cuantificación de árboles para su posterior indemnización y/o compensación. Además, las capas generadas son útiles como insumo base para cuantificación de viviendas y tendencia de crecimiento de las zonas urbanas, así como identificar las zonas con tendencia a la erosión e inundación por medio de índices, y generación de modelamiento hidrológico e hidráulico. Como se mencionó con anterioridad la proporción de datos del terreno mediante LiDAR es 800.000 veces más que un levantamiento convencional. Lo que significa un gran volumen de datos y la posibilidad de extraer más información del área de interés. Como por ejemplo, la detección de edificaciones donde identificaron 1683 unidades. Si se hace un comparativo con la topografía tradicional, este volumen de información tomaría una mayor cantidad de tiempo. Empleando una sola comisión en campo, generalmente el rendimiento es de 40 casas/día, debido a los tiempos muertos por las grandes distancias que se deben recorrer desde una población a otra, lo que daría unos 52



días de ejecución. Por lo tanto, en vista de la necesidad de optimizar esta ejecución; se deben aumentar el número de comisiones lo que se traduciría en mayores costos, impactando lógicamente en el presupuesto del proyecto. Y solamente que se está hablando de viviendas, falta considerar las zonas arbustivas e individualización de árboles. Estos últimos, por métodos tradicionales el rendimiento en un conteo es de 2 a 3 hectárea/día aproximadamente en bosque natural, por métodos de procesamiento de imágenes se detectó 300 hectáreas/día. Es decir, el volumen de información y el ahorro en tiempo obtenido es mayor en casi 100 veces. Tareas increíblemente complejas en términos topográficos, se pudo calcular en tan solo 10 días empleando algoritmos sobre los insumos proveniente de los sensores. Igualmente aplica para la geomorfología donde el resultado más importante es de tipo cualitativo. El uso de la metodología RRIM, el cálculo de líneas de escorrentía, e índices SPI y CTI permitió exponer detalles de las geoformas que estaban ocultas a lo largo de los 50 kilómetros, y que analizando los tipos de erosión dan un indicio del tipo de suelo en el terreno. Algo que no es posible de identificar empleando sólo una fotografía aérea o un plano topográfico tradicional debido a que no tiene suficiente información del área de interés por su poca densidad de puntos, además de estar limitado a áreas no tan extensas en comparación con el LiDAR. Adicionalmente, el uso de los índices sobre levantamientos tradicionales, lo más probable es que los resultados no reflejarían la realidad del terreno. Esto debido a que generalmente un levantamiento topográfico convencional no contiene una gran densidad de puntos que permita representar de forma muy aproximada del territorio. Por lo tanto, la omisión de ciertos detalles influyen sobre el cálculo de estos. Paralelamente, la situación es igual para la modelación hidrológica e hidráulica, el LiDAR representa de forma mucho más precisa la topografía del sitio de interés. Por lo que se tiene más detalles de la morfología del terreno y que a la hora de modelar el flujo sobre este, es más probable que se acerque a la realidad. La importancia de esta información radica en su uso a nivel transversal sobre las diferentes áreas involucradas en el proyecto. Por lo tanto, para realizar una mejor evaluación de rutas y dar un salto cualitativo y cuantitativo en comparación con una topografía

convencional, el uso de sensores remotos es una herramienta innovadora y útil donde la frontera del conocimiento para análisis del terreno, con respecto a su volumen, tiempo y calidad de la información. Permite alcanzar nuevos niveles de comprensión a la hora medir los impactos sociales, económicos y medio ambientales de un proyecto de infraestructura.

## 9. BIBLIOGRAFIA

A. Schowengerdt, R. (2007). Remote Sensing: Models and Methods for Image Processing. Elsevier.

Agencia Nacional de Infraestructura. (2015). topografía con tecnología LiDAR para el proyecto vial Bogotá Girardot.

Anbazhagan, Subramanian, S. K., y Yang, X. (2011). Geoinformatics in Applied Geomorphology. CRC Press.

Anbazhagan, Trommler, y Csaplovic. (2011). Airborne Laser Scanning and Very High Resolution Satellite Data for Geomorphological Mapping in Parts of Elbe River Valley. CRC Press.

Aparicio, F. J. (1992). Fundamentos de hidrología de superficie. Grupo Noriega.

Ariza, A. (2013). Descripción y Corrección de Productos Landsat 8 LDCM. CIAF.

Awrangjeb, M. (2015). Effective Generation and Update of a Building Map Database Through Automatic Building Change Detection from LiDAR Point Cloud Data. Remote Sensing Magazine.

Bethel, J. S., Gelder, B. H., Cetin, A. F., y Sampath, A. (2006). Corridor mapping using aerial technique. U.S. Department of Transportation.

Breña, A. F., y Jacobo, M. A. (2002). Principios de hidrología superficial. Universidad Autónoma Metropolitana.

Cabrera, E., Galindo, G., y Vargas, D. (2011). Protocolo de procesamiento digital de imágenes para la cuantificación de la deforestación en Colombia. a. Instituto de Hidrología, Meteorología, y Estudios Ambientales IDEAM.

Campbell, B., y H. Wynne. (2011). introduction to remote sensing. Fifth edition. Guilford Press.

Canadá Centre for Remote Sensing. (2010). Introducción a la percepción remota mediante radar. Ottawa: Natural Resources Canada.

Cao, X., Chen, J., Imura, H., y Higashi, O. (2009). A SVM-based method to extract urban areas from DMSP-OLS and SPOT VGT data. Elsevier.

Carbonneau, P., y Piegay, H. (2013). Fluvial Remote Sensing for Science and Management. West Sussex, UK: Wiley-Blackwell.

Chao, L. (1997). Introducción a la estadística. Compañía Editorial Continental.

Charlton, M., Large, A., y Fuller, I. (2003). Application of airborne LiDAR in river environments: the River Coquet, Northumberland UK. Earth Surface Processes and Landforms, 299-306.

Chen, Q., Laurin, G. V., J. J., y Saah, D. (2011). Integration of airborne LiDAR and vegetation types derived from aerial photography for mapping aboveground live biomass. Elsevier.

Chen, R.-F., Lin, C.-W., Chen, Y.-H., He, T.-C., y Fei, L.-Y. (2015). Detecting and Characterizing Active Thrust Fault and Deep-Seated Landslides in Dense Forest Areas of Southern Taiwan Using Airborne LiDAR DEM. *Remote Sensing Magazine*.

Chuvieco, E. (1996). *Fundamentos de teledetección Espacial*. Rialpv S.A.

Clintock, M. (2008). *LIIDAR REMOTE SENSING DATA COLLECTION: ALASKA PIPELINE, AK*. *Alaska Division of Geological & Geophysical Surveys*.

Definiens Developer. (2000). *Reference book ecognition*.

Di Baldassare, G. (2013). *Floods in a Changing Climate. Inundation Modeling*. International Hidrology Series.

Diaz-Granados, O., y Vargas, M. (1998). *Curvas sintéticas regionalizadas de intensidad-duración-frecuencia para Colombia*. Uniandes.

Duque Escobar, G. (1999). *Manual de geología para ingenieros*. Universidad Nacional de Colombia.

Elberink, S. O., y Vosselman, G. (2005). *3D MODELLING OF TOPOGRAPHIC OBJECTS BY FUSING 2D MAPS AND LIDAR*. International Institute for Geoinformation Science and Earth Observation (ITC).

El-Sheimy, N., Valeo, C., y Habib, A. (2005). *Digital Terrain Modeling*. Boston, Mass: Artech House.

Enrique Lemos. (2012). *Tecnología LiDAR aporta al desarrollo de las regiones*. Anales de ingeniería.

ESRI. (2016). Arcmap user document.

Euillades, P., Vénere, M., Clause, A., L., V., Varni, M., y Usunoff, E. (2002). Modelos Digitales de Elevaciones para Simulación Computacional de Inundaciones: Interferometria vs Cartografía. American Congress on Mechanical Computational.

Felgueiras, C., y Goodchild, M. (1995). Two Papers on Triangulated Surface Modeling. National Center for Geographic Information and Analysis, 4-5.

Fleming, C., Marsh, S., y Giles, J. (2010). Elevation Models for Geoscience. GEOLOGICAL SOCIETY.

Fondo de Adaptación. (2012). ESTUDIOS PREVIOS PARA LA CONTRATACIÓN DE LA ELABORACIÓN DE LA TOPOGRAFÍA Y BATIMETRÍA A PARTIR DE LOS DATOS LIDAR Y BATIMÉTRICOS EN LA REGIÓN DE LA MOJANA, AFECTADA POR EL FENÓMENO DE LA NIÑA 2010-2011. Presidencia de la República de Colombia.

Fowler, A., France, J. I., y Truong, M. (2009). Applications of Advanced Laser Scanning Technology in Geology. Elsevier.

Franz, R., y Simon, C. (2009). Building and Road Extraction by LiDAR and Imagery.

Fung, K., Fraser, D., y Gauthier, R. (1998). Application of Remote Sensing Data for Monitoring of Gas Pipeline Right-of-Way. Canada Centre for Remote Sensing.

Fung, K., Fraser, D., y Gauthier, R. (1998). Application of Remote Sensing Data for Monitoring of Gas Pipeline Right-of-Way. Canadá Centre for Remote Sensing.

Ganendra, D., y Ganendra, T. R. (2007). Topographical y Digital Imagery Survey for Highway Alignment Project using LiDAR. Minconsult Sdn. Bhd. y Ground Data Solutions Sdn Bhd.

Gao, F., Stanic, S., Bergant, K., Li, Y., Li, S., Hua, D., y Wang, L. (2015). Application of the Ultraviolet Scanning Elastic Backscatter LiDAR for the Investigation of Aerosol Variability. Remote Sensing Magazine.

Gobron, N., Pinty, B., Verstraete, M. M., y Widlowski, J. L. (2000). Advanced vegetation indices optimized for up-coming sensors: Design, performance, and applications. Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on.

Gomez, I., Gomez, M., y Bertel, L. (2010). Uso de la Tecnología LiDAR en la evaluación de proyectos viales. Ventana informática.

Gonzales Vallejo, L., Ferrer, M., Ortuño, L., y Oteo, C. (2004). Ingeniería Geológica. Pearson.

Gopalakrishnan, R., Thomas, V., Coulston, J., y Wynne, R. (2015). Prediction of Canopy Heights over a Large Region Using Heterogeneous LiDAR Datasets: Efficacy and Challenges. Remote Sensing Magazine.

Graham, L. (2009). Management of LiDAR Data. CRC Press.

Heritage, G., y Large, A. (2009). Laser Scanning for the Environmental Sciences. West Sussex, UK: Wiley-Blackwell.

Hooper, W., y Frick, G. (2010). LiDAR detected spike returns. Journal of Applied Remote Sensing.

International River Interface Cooperative. (2016). <http://i-ric.org/>. Obtenido de Iric Software.

INVIAS. (2009). Manual de drenaje para carreteras. Ministerio de Transporte.

J. Schmugge, T., P. Kustas, W., C. Ritchie, J., y J. Jackson, T. (2002). Remote sensing in hydrology. Elsevier.

Jian, G. L., y Philippa, J. M. (2010). Essential Image Processing and GIS for Remote Sensing. Wiley-Blackwell.

Jie, y Aparajithan, (2009). Building Extraction from LiDAR Point Clouds Based on Clustering Techniques.

Konecny, G. (2014). Geoinformation Remote Sensing, Photogrammetry, and Geographic Information Systems. CRC Press.

L. Heritage, G., y R.G. Large, A. (2010). Laser Scanning for the Environmental Sciences. Blackwell.

L. Prost, G. (2013). Remote Sensing for Geoscientist. Image analysis and integration. Third edition. CRC Press.

Lavender, S., y Lavender, A. (2016). Practical Handbook of Remote Sensing. CRC Press.

Maltamo, M., Næsset, E., y Vauhkonen, J. (2014). Forestry Applications of Airborne Laser Scanning. Springer.

Marghany, M. (2016). Environmental applications of remote sensing. ExLi4Eva.



Martínez, C., Aunta, J., y Valero, J. (2013). Aplicación de datos LiDAR en la estimación del volumen forestal en el parque metropolitano bosque San Carlos. Ciencia e ingeniería Neogranadina.

Melo, L., y Camacho, M. (2005). Interpretación visual de imágenes de sensores remotos y su aplicación en levantamientos de cobertura y uso de la tierra. IGAC.

Milenković, M., Pfeifer, N., y Glira, P. (2015). Applying Terrestrial Laser Scanning for Soil Surface. Remote Sensing Journal.

Monsalve, G. (1995). Hidrología en la Ingeniería. Escuela Colombiana de ingeniería.

Navulur, K. (2007). Multispectral Image Analysis Using the Object-Oriented Paradigm. CRC Press.

Paine, D. P., y Kiser, J. D. (2012). Aerial Photography and Image Interpretation. Wiley.

Parra, A. (2017). Observaciones Generales para mejorar propuesta de investigación "Análisis del territorio empleando sensores remotos como alternativa a métodos topográficos tradicionales direccionado a proyectos lineales de infraestructura".

Petrie, G., y Toth, C. K. (2009). Introduction to Laser Ranging, Profiling, and Scanning. TOPOGRAPHIC LASER RANGING AND SCALING.

Pfeifer, N., y Mandlburger, G. (2009). LiDAR Data Filtering and DTM Generation.

Price, W., y Uren, J. (1989). Laser Surveying. London: Van Nostrand Reinhold International.

Prieditis, I. S., Dagis, S., y Dubrovskis, D. (2012). Individual tree identification using different LIDAR and optical imagery data processing methods. Bit-Journal.

Promigas. (2014). Informe técnico LiDAR y estudio geológico para el gasoducto Puente Doctor-Tucurinca. Magdalena, Colombia. Barranquilla, Colombia.

Repaka, S., O'Hara, C., y Truax, D. (2003). ANALYSIS OF REMOTELY SENSED DATA FOR PLANNING TRANSPORTATION NETWORKS. National Consortium on Remote Sensing in Transportation.

Repaka, S., O'Hara, C., y Truax, D. (2003). ANALYSIS OF REMOTELY SENSED DATA FOR PLANNING TRANSPORTATION NETWORKS. . National Consortium on Remote Sensing in Transportation.

Richards, J. A. (2013). Remote Sensing Digital Image Analysis. Springer.

Rokni, K., Ahmad, A., Selamat, A., y Hazini, S. (2014). Water Feature Extraction and Change Detection Using Multitemporal Landsat Imagery. Remote Sensing Magazine.

Russell Turner a, b. R. (2013). Estimation of soil surface roughness of agricultural soils using. Elsevier.

Shan, J., y K. Toth, C. (2009). Topographic Laser Ranging and Scanning. principles and processing. CRC Press.

Torres, y Gonzales. (2010). Aplicación del modelo de simulación hidráulica Hec-Ras para la emisión de pronósticos hidrológicos de inundaciones en tiempo real, en la cuenca media del río Bogotá - sector Alicachin. Universidad Distrital.

Transportation Reseach Board. (2001). Remote Sensing for transportation. Transportation Reseach Board.

Trimble. (2012). Ecognition Reference book.

Tschanz, Marvin, y Cruz. (1969). Geology of the Sierra Nevada de Santa Marta (Colombia). Bogotá, Ingeominas.

Universidad de Murcia. (2010). Introducción Teledetección.

Ven te Chow (1994). Hidrologia aplicada. Mcgraw hill.

Weng, Q. (2010). Remote sensing and GIS Integration, Theories Methods and Applications. McGraw-Hill.

Zhang, y Cui. (2007). Airborne LiDAR Data Processing and Analysis Tools. National Center for Airborne Laser Mapping.

## 10. ANEXOS

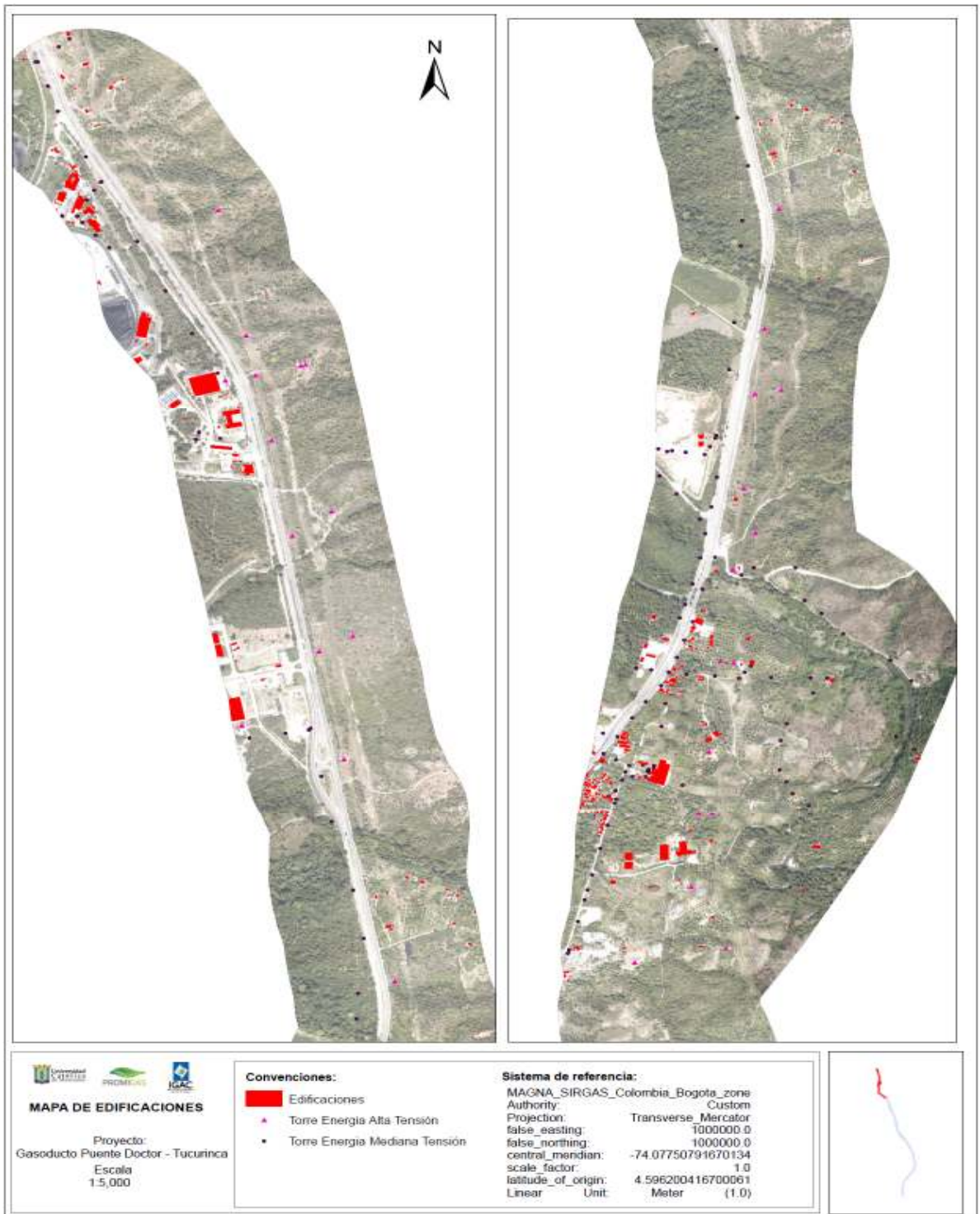


Figura 80. Mapa de edificaciones. Fuente: Elaboración propia, 2016.



Figura 81. Mapa de alturas de zonas Arbustivas mayores a 3 metros. Fuente: Elaboración propia, 2016.



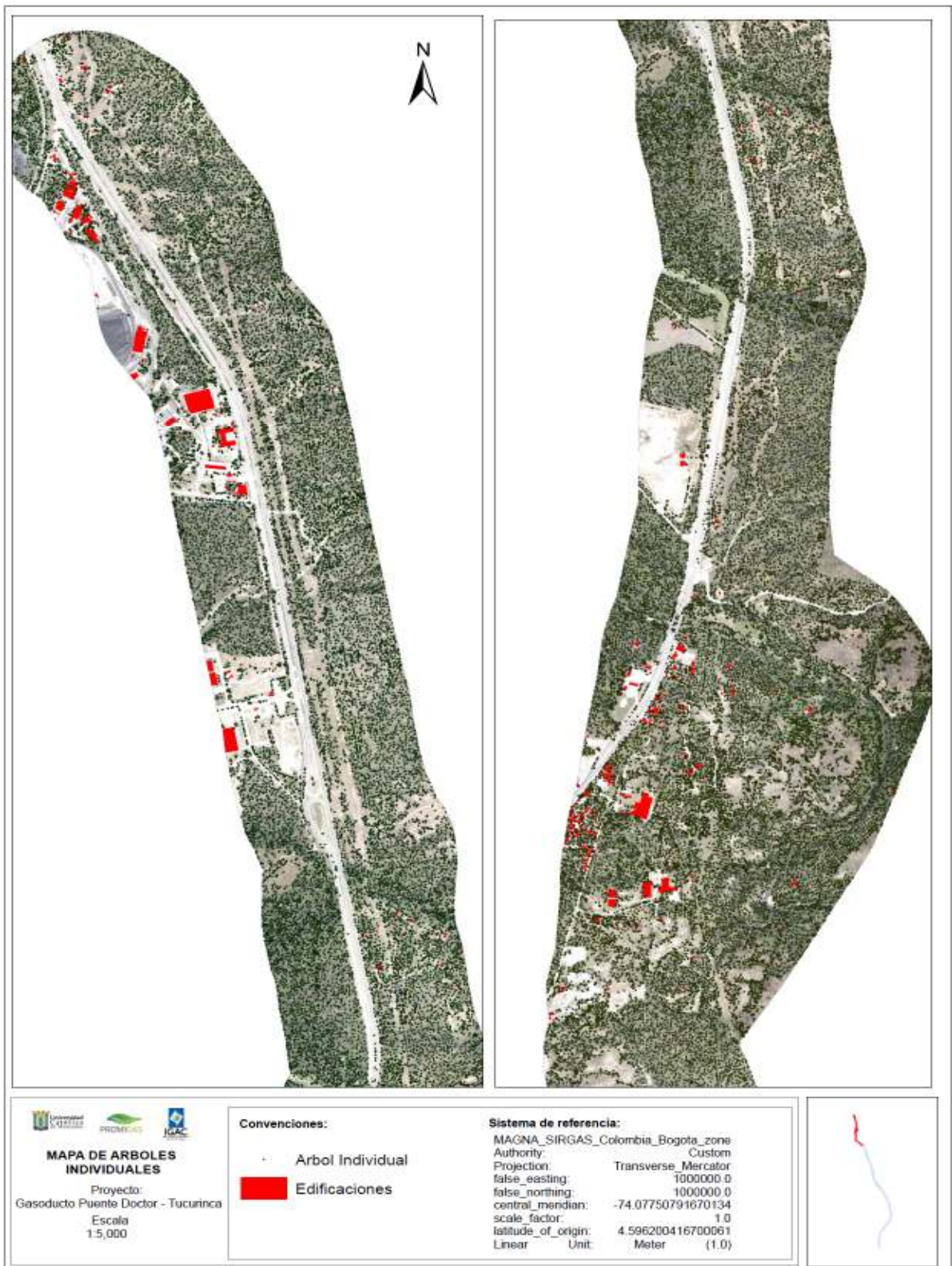


Figura 82. Mapa de árboles individuales. Fuente: Elaboración propia, 2016.



Figura 83. Mapa de geomorfología. Fuente: Elaboración propia, 2016.



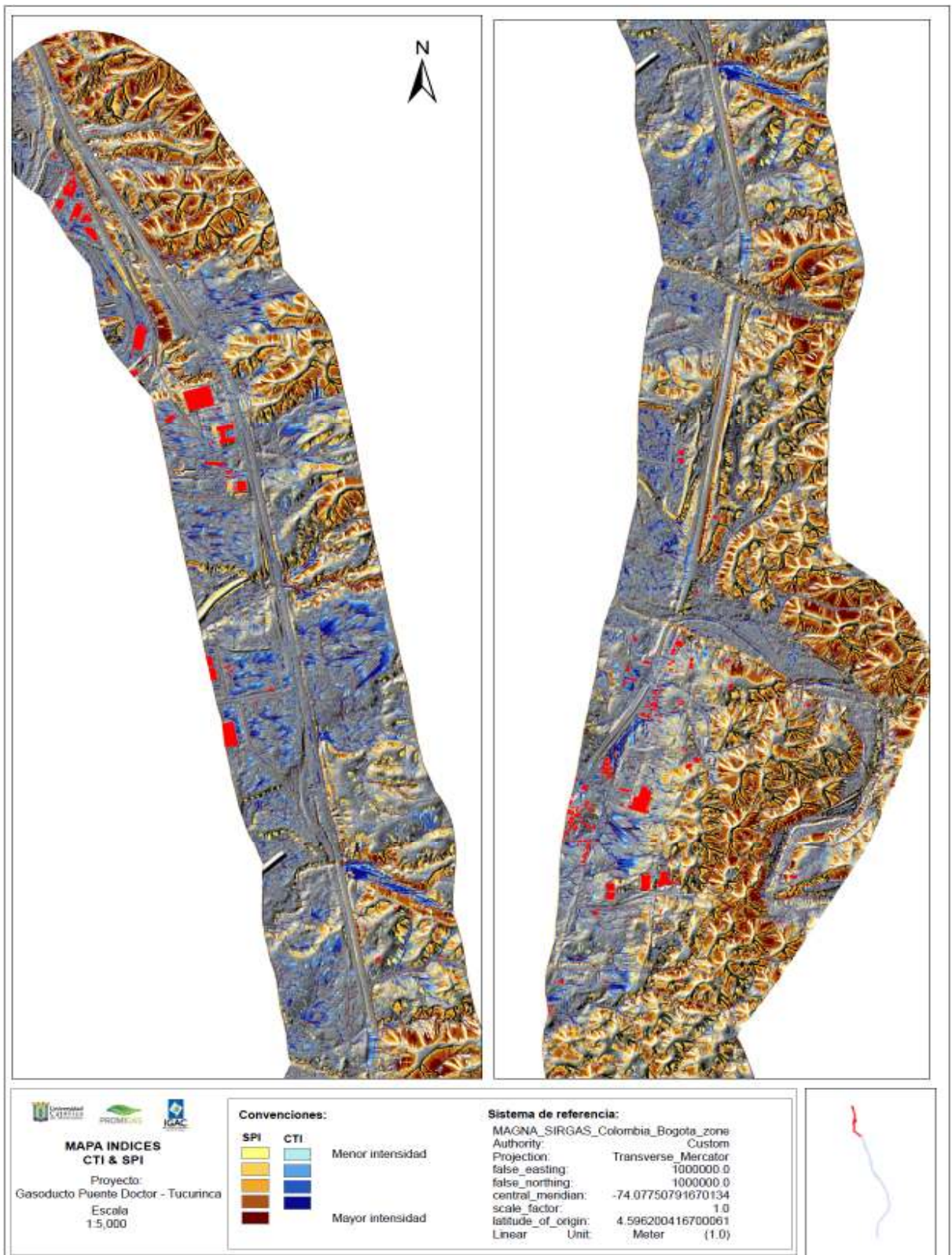


Figura 84. Mapa de índices CTI y SPI. Fuente: Elaboración propia, 2016.



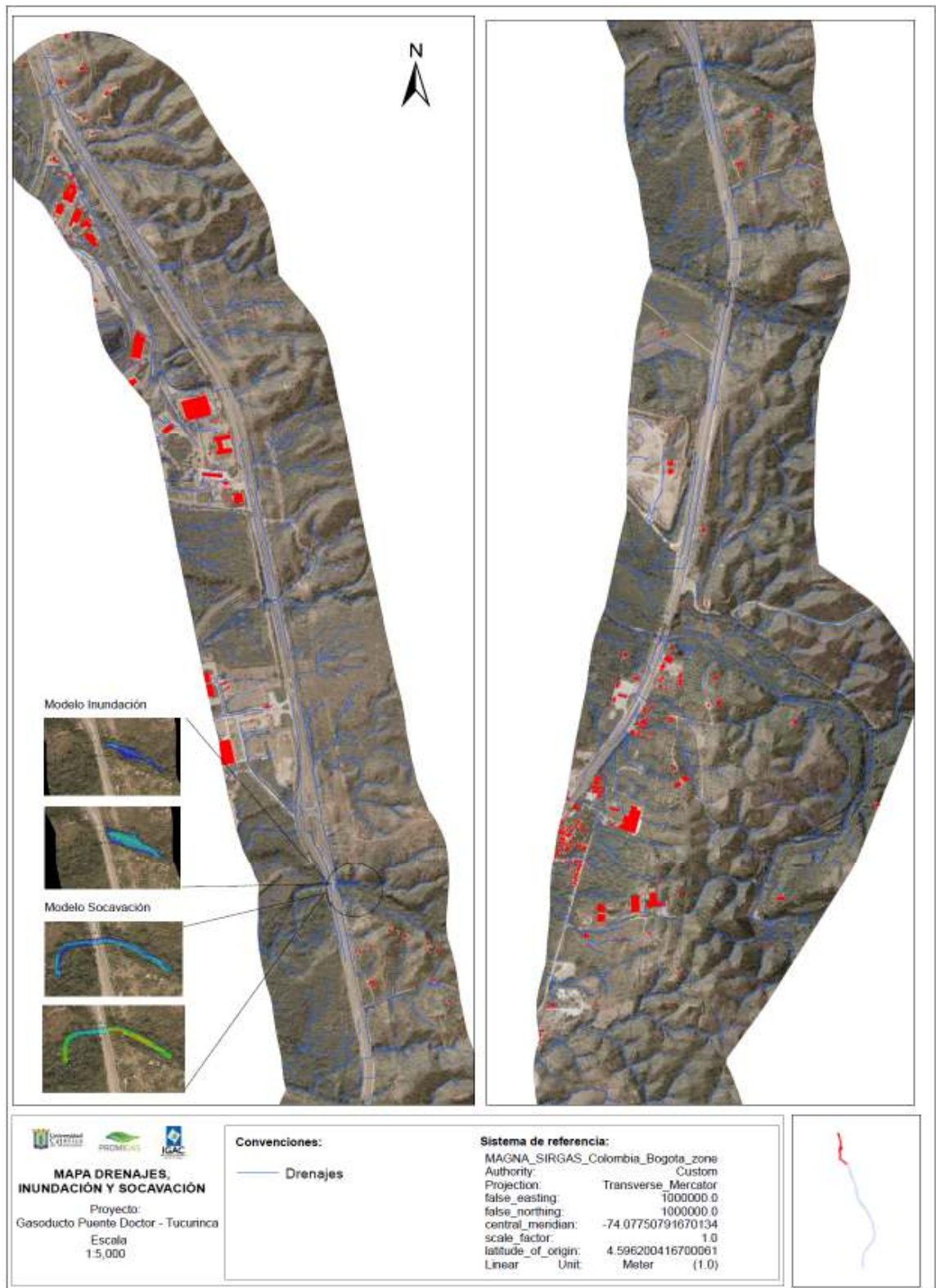


Figura 85. Mapa de drenajes, inundación y socavación. Fuente: Elaboración propia, 2016.

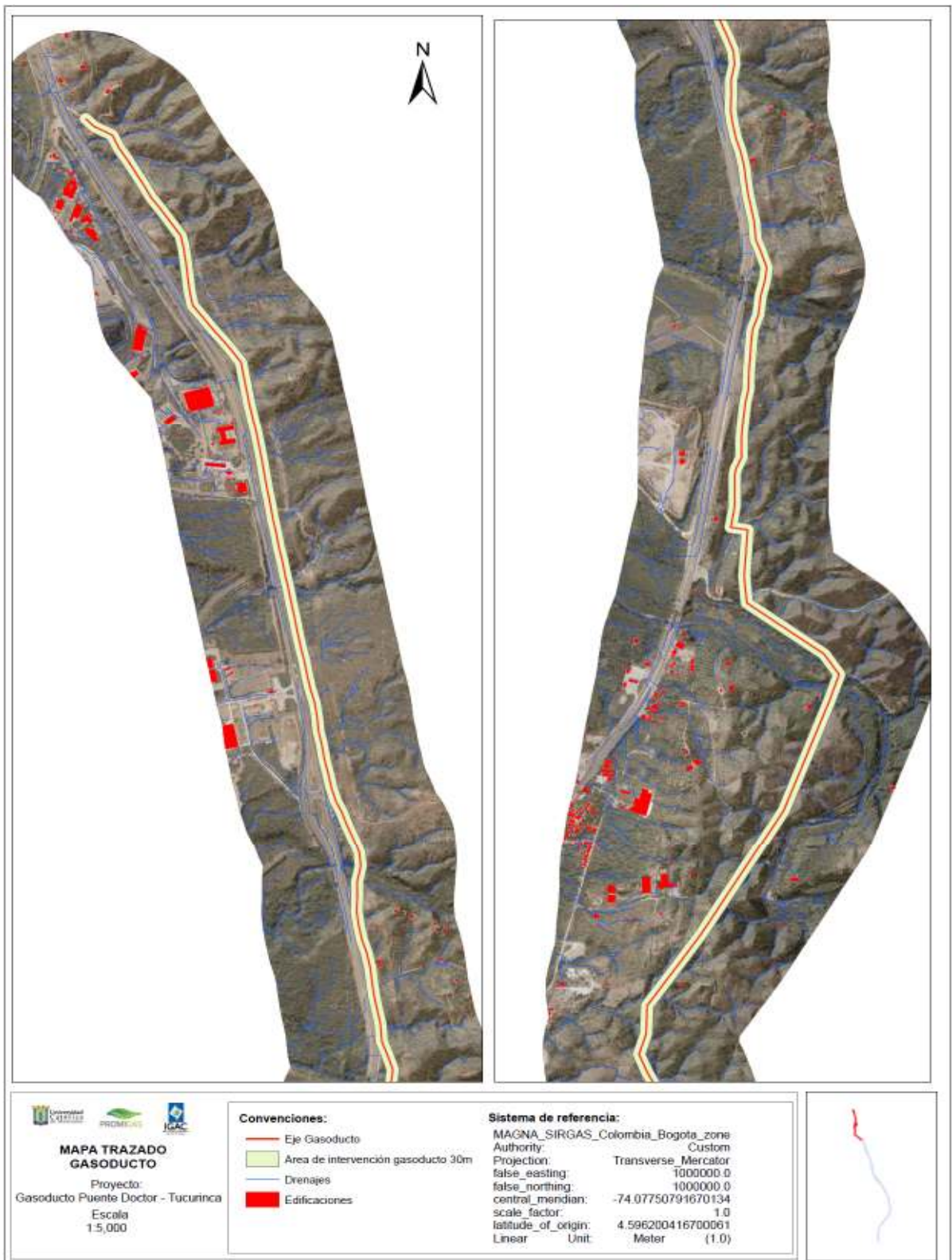


Figura 86. Mapa de trazado del gasoducto. Fuente: Elaboración propia, 2016.

