



UNIVERSIDAD DE JAÉN
Centro de Estudios de Postgrado

Trabajo Fin de Máster

**CLASIFICACIÓN EN FUNCIÓN DEL
RIESGO POTENCIAL POR
INUNDACIÓN DEBIDO A LA
ROTURA DE UNA Balsa.
COMPARACIÓN DE RESULTADOS
USANDO UN MDE A PARTIR DE
LIDAR E INSAR**

Alumno/a: Sampedro Martínez José Manuel

Tutor/a: Prof. D. Antonio Miguel Ruiz Armenteros
Dpto: Departamento de Ingeniería Cartográfica,
Geodésica y Fotogrametría

Noviembre, 2.021

RESUMEN

En el presente Trabajo Fin de Máster se ha abordado el estudio de inundabilidad producido por la rotura de un embalse, utilizando como datos de partida modelos digitales del terreno obtenidos con diferentes tecnologías.

Por un lado se ha realizado el estudio de inundabilidad a partir de un modelo de digital del terreno obtenido por tecnología Lidar, y por otro lado se han utilizado modelos digitales del terreno obtenidos con tecnología InSAR.

El objetivo principal de este estudio es comprobar la validez de la tecnología InSAR para la realización de estudios de inundabilidad, para lo cual se realizan comparaciones de los resultados obtenidos con esta tecnología y la tecnología Lidar, la cual es la más utilizada y validada para ser usada como base en los estudios de inundabilidad.

ÍNDICE

1.- Introducción	3
2.- Ubicación del embalse y zona de estudio	6
3.- Materiales y métodos	7
3.1.- Satélites ERS	8
3.2.- Satélites Sentinel-1	11
3.3.- Satélite ALOS	15
3.4.- Misión SRTM	18
4.- Elaboración de los MDE con imágenes RADAR	19
4.1. Selección de las imágenes	19
4.1.1.- Imágenes ERS	21
4.1.2.- Imágenes Sentinel-1	23
4.1.3.- Imágenes ALOS	27
4.2.- Procesamiento de Imágenes con SNAP	29
4.2.1.- Corregistro de las imágenes	31
4.2.2.- Descargar información de la órbita	32
4.2.3.- Creación del interferograma	32
4.2.4.- Filtrado de fase Goldstein	34
4.2.5.- Desenvolver la fase (Unwrapping)	35
4.2.6.- Transformar de fase a elevación	36
4.2.7.- Corrección de terreno (Georreferenciar)	36
4.2.8.- Resultados del procesado	37
4.3.- Obtención del MDT SRTM	38
4.4.- Obtención del MDT LIDAR	40
4.5.- Discusión y análisis de los distintos resultados	41
5.- Estudio hidráulico	48
5.1.- Introducción	49
5.2.- Objeto del estudio de inundabilidad para un embalse	49
5.2.1.- Niveles de clasificación	50

5.3.- Simulación	51
5.3.1- Elección del modelo	51
5.3.2- Datos de entrada	52
5.3.3.- Características del cauce aguas abajo	54
5.3.4.- Resultados	61
6.- Conclusiones	72
7.- Referencias	74
ANEXO – Resultado de las simulaciones	75

1.- Introducción

En la actualidad los MDT obtenidos por tecnología Lidar son los más utilizados y validados para usar en estudios de inundabilidad, complementados habitualmente por levantamientos topográficos.

En este TFM vamos a usar la tecnología InSAR para obtener varios MDT y poder compararlos con los obtenidos con tecnología Lidar. Vamos a comparar cuatro MDT con tecnología InSAR. Tres los vamos a elaborar con el programa informático SNAP, a partir de imágenes obtenidas de los satélites radar ERS, Sentinel-1 y ALOS, y un cuarto a partir de la misión SRTM. Este último no será creado en este TFM, sino que se obtendrá directamente a través del complemento *SRTM Downloader* de QGIS.

Se han elegido imágenes de satélites equipados con radar de distinta longitud de onda. Los satélites ERS y Sentinel-1 van equipados con un radar de la banda C ($\lambda = 5,6$ cm) y el satélite ALOS con un radar que opera en la banda L ($\lambda = 24,6$ cm). Esto nos va a permitir comparar MDT realizados con distinta longitud de onda y observar las diferencias obtenidas.

El proceso que se seguirá en este TFM, se divide en dos partes que se describen a continuación:

Creación de los Modelos Digitales del Terreno (MDT):

En primer lugar vamos a elegir las imágenes, atendiendo a la línea base temporal y a la línea base perpendicular más adecuada para realizar los MDT.

Posteriormente realizaremos el procesamiento de los distintos MDT radar con el software informático SNAP (ESA) y obtendremos los MDT de ERS, Sentinel-1 y ALOS.

Después nos descargaremos el MDT de la misión SRTM a través del complemento *SRTM Downloader* de QGIS y el MDT Lidar de la Web del IGN (Instituto Geográfico Nacional).

Y por último compararemos los resultados y elegiremos cuales van a ser utilizados en el siguiente parte de este TFM.

Modelización del estudio de inundabilidad:

En este apartado se procede a la realización de la simulación numérica de las distintas inundaciones a través del programa informático HEC-RAS, software gratuito del Cuerpo de ingenieros de la armada de los Estados Unidos.

Se ha elegido para la modelación un embalse mediano-pequeño porque la modelización de un embalse pequeño es más sensible dependiendo el MDT que se elija ya que produce una avenida de inundación relativamente pequeña.

Un embalse grande produciría una avenida que se llevaría todas las estructuras de paso de una carretera. Por el contrario, un embalse mediano-pequeño genera una avenida, que dependiendo de la estructura existente en la carretera puede o no ser afectada.

Hay que tener en cuenta que las estructuras de paso están dimensionadas para avenidas de agua producidas por la lluvia y en el caso de un embalse grande serían afectadas con independencia del MDT que usemos. En primer lugar se relacionan los distintos tipos de embalses atendiendo a su geometría y los distintos niveles de clasificación en función del riesgo potencial de estas.

Posteriormente se realiza la simulación con el software HEC-RAS. Se realizan tantas simulaciones y generamos tantos modelos de inundación como MDT vayamos a comparar.

Al final clasificamos el embalse atendiendo a los diferentes resultados obtenidos y comparamos los resultados.

En conclusión los objetivos de este trabajo son los siguientes:

- Aplicar la tecnología InSAR para la obtención de MDT utilizando imágenes SAR de las bandas C y L, comparando los resultados obtenidos y analizando las ventajas e inconvenientes de cada uno.
- Realizar un estudio de inundabilidad producida por la potencial rotura de una balsa de almacenamiento de agua utilizando los diferentes MDT obtenidos con tecnología SAR.

2.- Ubicación del embalse y zona de estudio

La ubicación del embalse objeto del presente TFM se encuentra en el término municipal de Jaén (Figuras 1 y 2), siendo sus coordenadas geodésicas y UTM las siguientes:

Datum:	ETRS89
Latitud:	37,8882498888
Longitud:	-3,6656999588
Huso UTM:	30
Coord. X:	441 464,42
Coord. Y:	4 193 625,07

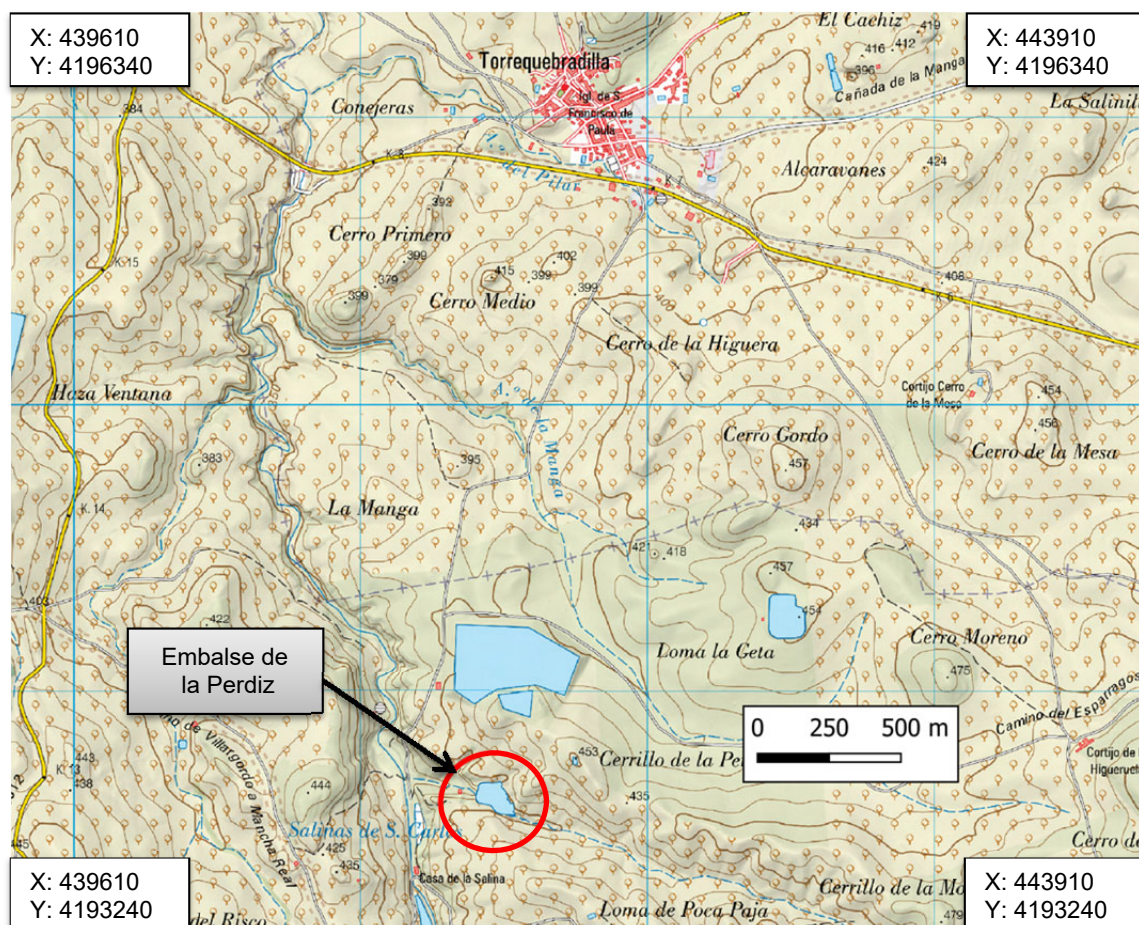


Figura 1. Ubicación embalse
Se indican las coordenadas UTM huso 30N de las esquinas de la imagen

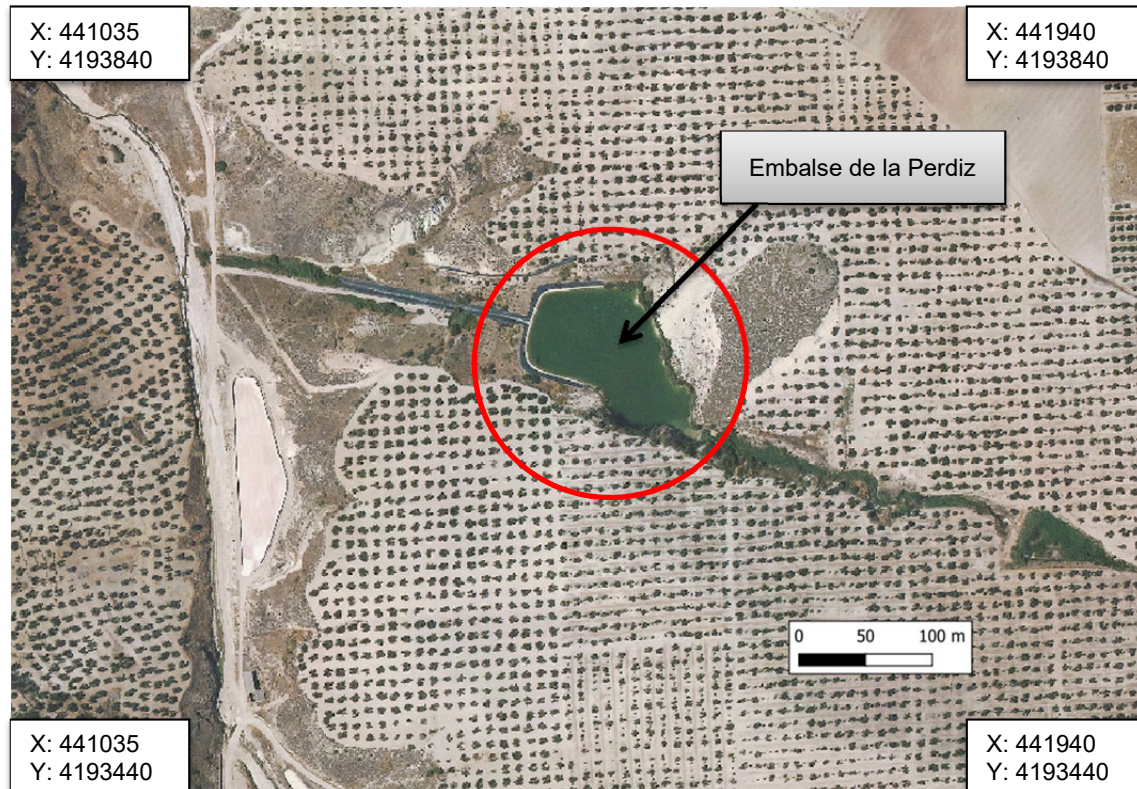


Figura 2. Ortofoto del embalse objeto de estudio

Se indican las coordenadas UTM huso 30N de las esquinas de la imagen

El estudio de inundabilidad discurrirá por el arroyo Salado, hasta su cruce con la carretera provincial A-6000, que une los municipios de Torrequebradilla y Villargordo.

3.- Datos SAR

Los distintos modelos digitales del terreno obtenidos por tecnología InSAR, han sido creados a partir de imágenes radar obtenidas por los satélites ERS, Sentinel y ALOS. Además se ha utilizado el modelo digital del terreno del SRTM, pero este obtenido directamente por el complemento *SRTM Downloader* de QGIS.

A continuación se describen los distintos satélites utilizados:

3.1.- Satélites ERS

El satélite europeo de percepción remota ERS-1 (Figura 3), lanzado en 1991, transportaba una carga útil completa que incluía un radar de apertura sintética de imágenes, un altímetro de radar y otros poderosos instrumentos para medir la temperatura de la superficie del océano y los vientos en el mar. ERS-2 (Figura 3 y 4), que se superpuso con ERS-1, se lanzó en 1995 con un sensor adicional para la investigación del ozono atmosférico.

En el momento de su lanzamiento, los dos satélites ERS eran las naves espaciales de observación de la Tierra más sofisticadas jamás desarrolladas y lanzadas por Europa. Estos satélites de la ESA de gran éxito recopilaron una gran cantidad de datos valiosos sobre las superficies terrestres, los océanos y los casquetes polares de la Tierra y fueron llamados a monitorear desastres naturales como inundaciones graves o terremotos en partes remotas del mundo.

Ambos satélites ERS se construyeron con una carga útil central de dos radares especializados y un sensor de imágenes infrarrojas. Los dos fueron diseñados como gemelos idénticos con una diferencia importante: ERS-2 incluía un instrumento adicional para monitorear los niveles de ozono en la atmósfera.

Poco después del lanzamiento del ERS-2 en 1995, la ESA decidió vincular los dos satélites en la primera misión "tándem" que duró nueve meses. Durante este tiempo, el aumento de la frecuencia y el nivel de datos disponibles para los científicos ofrecieron una oportunidad única de observar cambios en un espacio de tiempo muy corto, ya que ambos satélites orbitaban la Tierra con solo 24 horas de diferencia.

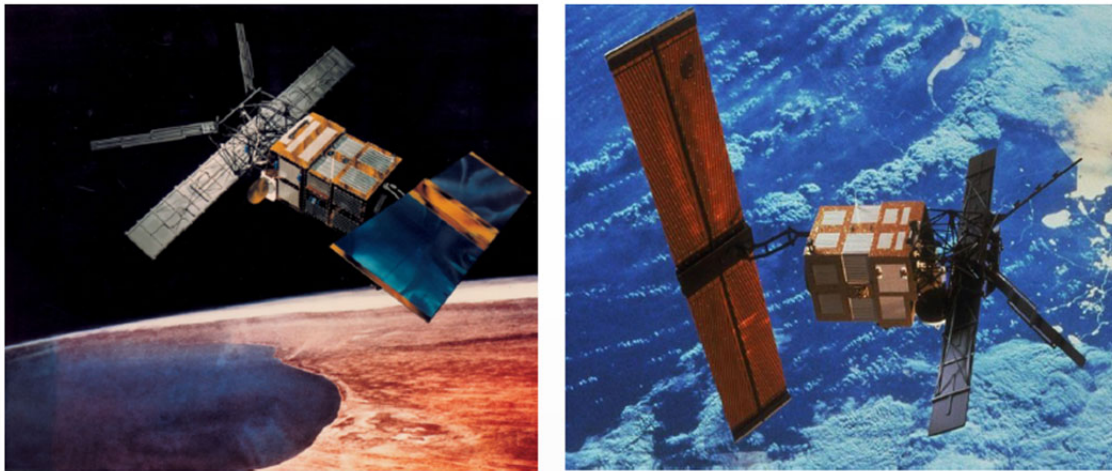


Figura 3. Detalle satélites ERS-1 (1991) y ERS-2 (1995)

En marzo de 2000, un fallo en el control de la computadora y el giróscopo llevó al ERS-1 finalmente a poner fin a sus operaciones, después de exceder con creces su vida útil planificada.

En julio de 2011, ERS-2 se retiró y comenzó el proceso de desorbitación del satélite.

Las características de los satélites ERS son las siguientes:

- Frecuencia: Banda C ($\lambda = 5,6$ cm)
- Polarización: VV
- Resolución: Az = 6-3 m
Rg = 26 M
- Tamaño de la imagen: 100 Km
- Ciclo de repetición: 35 días



Figura 4. Detalle satélite ERS-2 antes de su lanzamiento

3.2.- Satélites Sentinel-1

La misión está compuesta por una constelación de dos satélites, Sentinel-1A y Sentinel-1B (Figura 5), que comparten el mismo plano orbital.

Los satélites llevan un sensor C-SAR, una matriz solar desplegable y una gran capacidad de almacenamiento de datos. La misión puede proporcionar datos rápidamente en caso de monitorización de desastres.



Figura 5. Detalle Satélite Sentinel-1B (2016)

El satélite Sentinel-1A fue lanzado el 3 de abril de 2014 y el Sentinel-1B se lanzó el 25 de abril de 2016. Tienen una vida útil operativa de siete años. Se prevé que otros dos satélites (Sentinel-1C y Sentinel-1D) reemplacen a los dos primeros al final de su vida útil operativa.

Los objetivos de la misión Sentinel-1 son los siguientes:

- Monitorización terrestre de bosques, agua, suelo y agricultura
- Apoyo cartográfico de emergencia en caso de desastres naturales
- Vigilancia marina del medio marítimo
- Observaciones del hielo marino y seguimiento de los icebergs
- Producción de cartas de hielo de alta resolución
- Pronóstico de las condiciones del hielo en el mar
- Mapeo de derrames de petróleo
- Detección de embarcaciones marinas
- Seguimiento del cambio climático.

Órbita de la misión:

- Órbita circular síncrona con el sol, casi polar
- 693 km de altura de la órbita
- Inclinación 98,18 °
- Ciclo de repetición de 12 días en el Ecuador con un satélite, 175 órbitas / ciclo.

Características del Sensor:

Los satélites SENTINEL-1 llevan un sensor radar de apertura sintética de banda C que opera a una frecuencia de 5.405 GHz. Incluye una antena activa que proporciona un escaneo rápido en elevación y acimut y tienen una capacidad de almacenamiento de datos de 1410 Gb.

El sensor admite el funcionamiento en polarización dual (HH + HV, VV + VH). Los datos de polarización dual son útiles para la clasificación de la cobertura terrestre y las aplicaciones de hielo marino.

El sensor opera en cuatro modos de adquisición distintos (Figura 6):

- Stripmap (SM)
- Franja ancha interferométrica (IW)
- Franja extra ancha (EW)
- Modo de onda (WV).

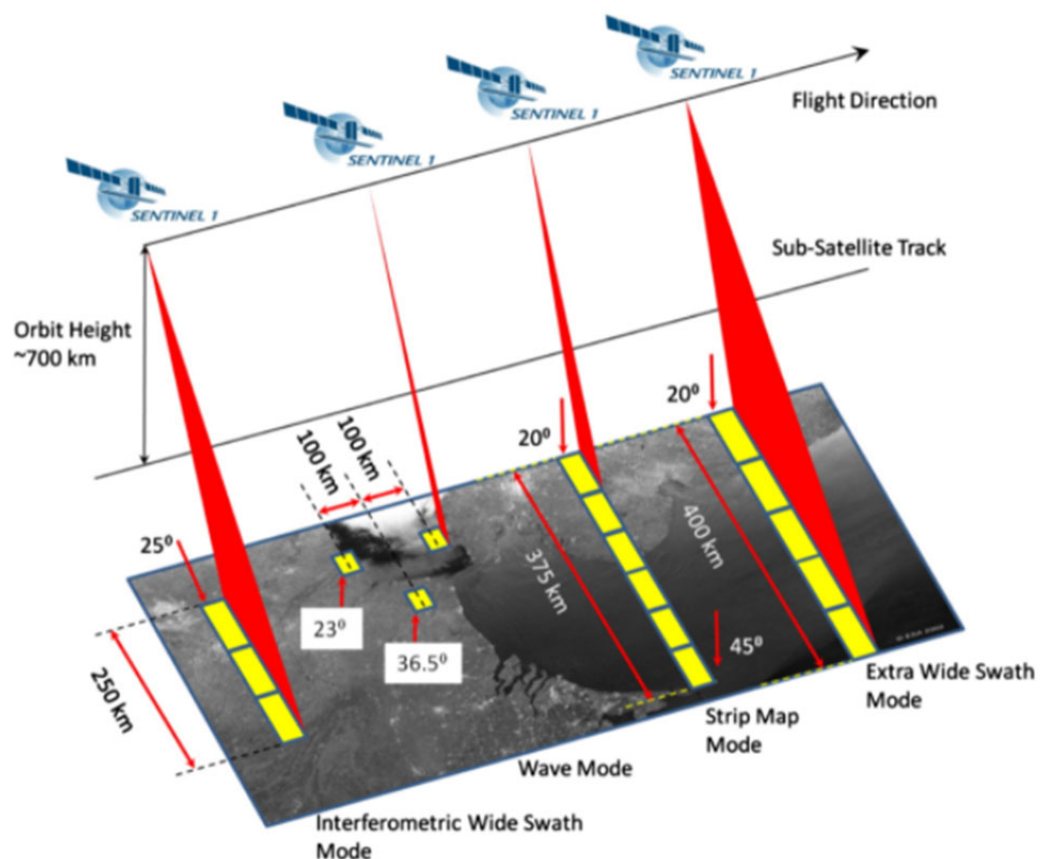


Figura 6. Modos de adquisición de datos en el SENTINEL-1

Modo Stripmap

El modo de imágenes Stripmap se proporciona para dar continuidad a las misiones ERS y Envisat. Stripmap proporciona cobertura con una resolución de 5 m por 5 m en una franja estrecha de 80 km. Se puede seleccionar una de las seis franjas de imágenes cambiando el ángulo de incidencia del haz y el ancho del haz de elevación.

Modo Interferometric Wide Swath

El modo Interferometric Wide Swath (IW) permite combinar un ancho de franja grande (250 km) con una resolución geométrica más pequeña (5 m x 20 m). El modo IW toma imágenes de tres subfranjas realizando la observación del terreno con escaneo progresivo SAR (TOPSAR). Con la técnica TOPSAR, además de dirigir el rayo en el rango como en SCANSAR, el rayo también se dirige electrónicamente de atrás hacia adelante en la dirección del azimut para cada ráfaga, dando como resultado una imagen de mayor calidad. La interferometría está asegurada por una superposición suficiente del espectro Doppler (en el dominio del azimut) y el espectro del número de ondas (en el dominio de la elevación). La técnica TOPSAR asegura una calidad de imagen homogénea en toda la franja.

El modo IW es el modo de adquisición predeterminado en tierra.

Modo Extra Wide Swath

El modo Extra Wide Swath (EW) está diseñado para servicios operativos marítimos, de hielo y de zonas polares donde se requiere una amplia cobertura y tiempos de revisión cortos. El modo EW funciona de manera similar al modo IW

empleando una técnica TOPSAR usando cinco sub-franjas en lugar de tres, lo que resulta en una resolución más baja (20 m por 40 m). El modo EW también se puede utilizar para interferometría como con el modo IW.

Modo Wave

El modo Wave, junto con los modelos globales de olas oceánicas, puede ayudar a determinar la dirección, la longitud de onda y la altura de las olas en los océanos abiertos.

Las adquisiciones en modo Wave se componen de imágenes de mapa de bandas de 20 km por 20 km, adquiridas alternativamente en dos ángulos de incidencia diferentes. Las imágenes de ondas se adquieren cada 100 km, con imágenes en el mismo ángulo de incidencia separadas por 200 km.

3.3.- Satélite ALOS

El Satélite de Observación Terrestre Avanzado (ALOS) fue un satélite japonés de imágenes de la Tierra de JAXA (Figura 7) que se lanzó el 24 de enero de 2006 y completó su fase operativa el 12 de mayo de 2011 después de fallar debido a una anomalía de energía.

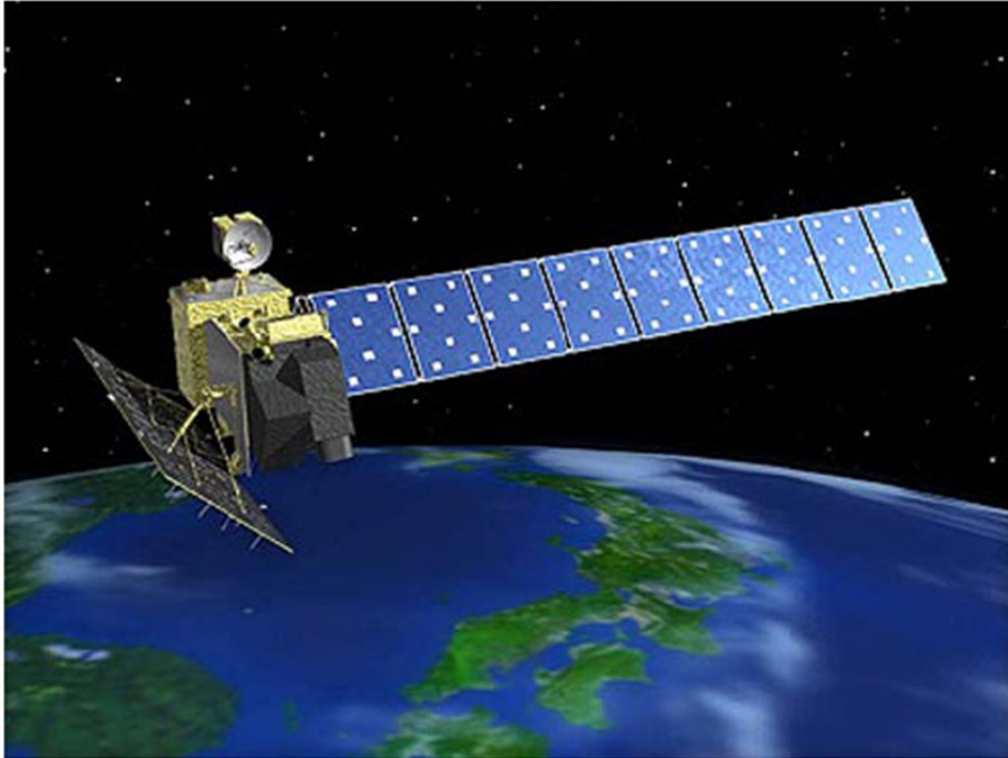


Figura 7. Detalle Satélite ALOS-1 (2006)

Además de otros instrumentos, el satélite ALOS-1 llevaba un radar de apertura sintética de banda L ($\lambda = 24,6$ cm).

El radar de apertura sintética de banda L de Phased Array (PALSAR) fue un sensor sucesor del radar de apertura sintética a bordo del JERS-1 con funciones más avanzadas, como una mayor capacidad de resolución espacial, ángulos variables fuera del nadir y modos adicionales como el modo de polarimetría completa y el modo ScanSAR.

ALOS-PALSAR fue desarrollado conjuntamente por JAXA, JAROS (la Organización del Sistema de Observación de Recursos de Japón) y METI (el Ministerio de Economía, Comercio e Industria de Japón). PALSAR es un instrumento de banda L de arreglo en fase de orientación lateral con una capacidad de apuntar de 8° a 60° de ángulo de incidencia. La antena SAR tiene un tamaño: 8,9 m de largo y 3,1 m de ancho. Una matriz de 80 módulos de transmisión / recepción está montada detrás de los paneles de antena. Se proporciona dirección de haz eléctrico en elevación.

Para asegurar la recopilación de datos espacial y temporalmente homogénea en escalas regionales, las adquisiciones se planificaron en unidades de ciclos completos repetidos (46 días), durante los cuales solo se seleccionó uno de los modos predeterminados disponibles. Además, la estrategia PALSAR se dividió en un plan para los pases ascendentes (nocturnos) y otro para los pases descendentes (diurnos).

Al igual que en las imágenes ERS el modo Stripmap es el usado en las imágenes ALOS.

3.4.- Misión SRTM

Esta misión consistía en un transbordador espacial equipado con dos antenas separadas espacialmente. Una de las antenas sirve como transmisor y receptor, mientras que la otra sirve como segundo receptor (Figura 8). Las imágenes producidas por las antenas son similares pero sutilmente diferentes debido a las diferentes geometrías de visualización.

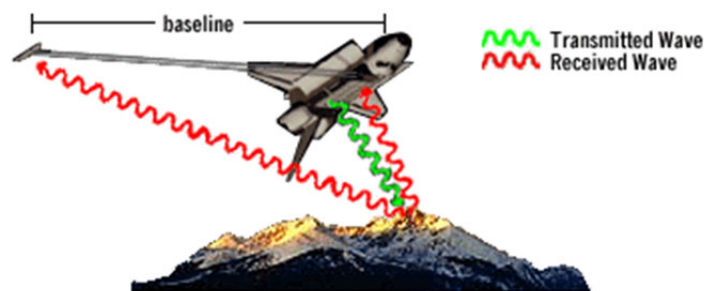


Figura 8. Detalle toma de datos

La NASA usó este enfoque de antena dual de un solo paso para su Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), que cartografió aproximadamente el 80% de la superficie terrestre de la Tierra entre 60° N y 56° S durante un vuelo de 11 días (11-22) en febrero de 2000.

Para SRTM, el sistema de radar SIR-C / X-SAR disponía de dos antenas secundarias receptoras de banda C y banda X montadas en la punta de un brazo de 60 m que podría extenderse desde la bahía de carga del transbordador espacial Endeavour hasta formar un interferómetro de un solo paso

Esta configuración, Endeavour / SRTM fue la estructura rígida más grande jamás volada en el espacio.

El objetivo principal de SRTM era producir un DEM mundial con una resolución espacial de 1 segundo de arco (~ 30 m), precisión de altura absoluta de 16 m y precisión de altura relativa de 10 m.

4.- Elaboración de los MDE con imágenes RADAR

4.1. Selección de las imágenes

Para una generación de un MDT es necesario la selección de un par de imágenes con las condiciones adecuadas.

Las condiciones más importantes que se precisan entre el par de imágenes para la realización de un MDT son:

- Una pequeña línea base temporal: El tiempo entre la primera y la segunda imagen debe ser lo más breve posible para reducir el riesgo de descorrelación temporal de la fase. Siempre que las superficies cambien entre la primera y la segunda adquisición, la señal estará fuera de fase y los resultados no serán buenos. Esto sucede sobre áreas de vegetación y agua, pero también bajo condiciones cambiantes de humedad, objetos en movimiento, etc. Especialmente la banda C (Sentinel-1 o ERS) es propensa a la descorrelación temporal debido a que la longitud de onda es corta. Por lo tanto, generar MDT desde imágenes Sentinel-1 o ERS será más complicado que usando imágenes obtenidas con bandas de mayor longitud de onda (Ejem. Imágenes ALOS)

- Una apropiada línea de base perpendicular: La distancia entre las posiciones de los satélites en el momento de la adquisición de la imagen debe ser de hasta 500 - 600 metros, dependiendo del satélite y la longitud de onda. Con esto se consigue un ángulo entre ambas imágenes que permite recuperar la topografía (Figura 9). Si la línea base es demasiado pequeña, estos efectos topográficos sobre la fase diferencial no serán lo suficientemente pronunciados. Por el contrario, con líneas base demasiado grandes, se pierde la coherencia de fase, lo que produce descorrelación.
- Condiciones atmosféricas apropiadas: El vapor de agua en la atmósfera provoca retrasos en la fase y disminuye la calidad de la medición. Por lo tanto, es aconsejable seleccionar las imágenes adquiridas durante períodos secos y asegurarse de que no se produzcan lluvias durante la adquisición de las imágenes.

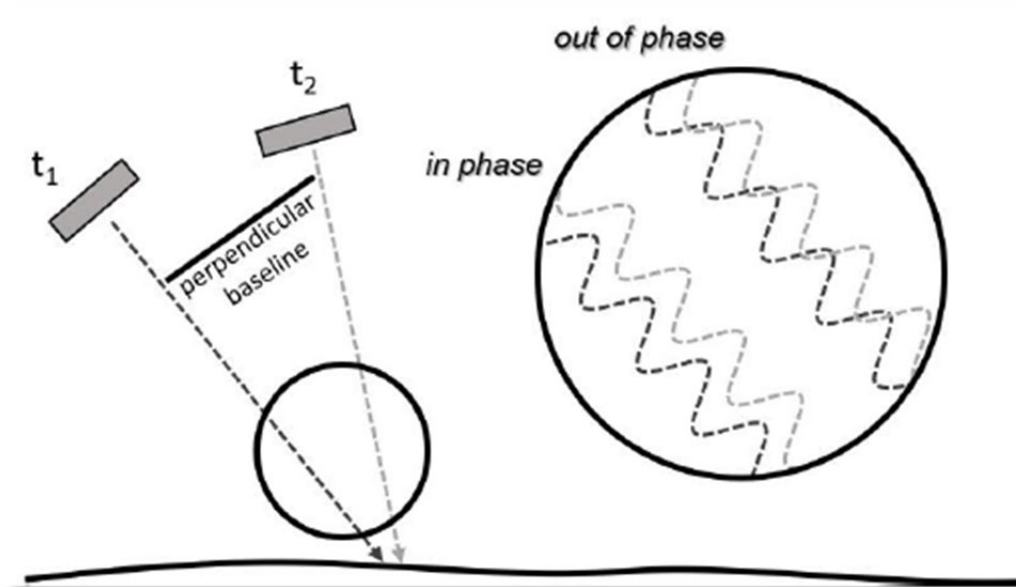


Figura 9. Geometría de la imagen y descorrelación de la fase.

4.1.1.- Imágenes ERS

Estas imágenes se obtienen de forma gratuita a través de la web de la ESA (Agencia Espacial Europea), a través del siguiente enlace: https://esars.ds.eo.esa.int/oads/access/collection/SAR_IMP_1P (Figura 10).

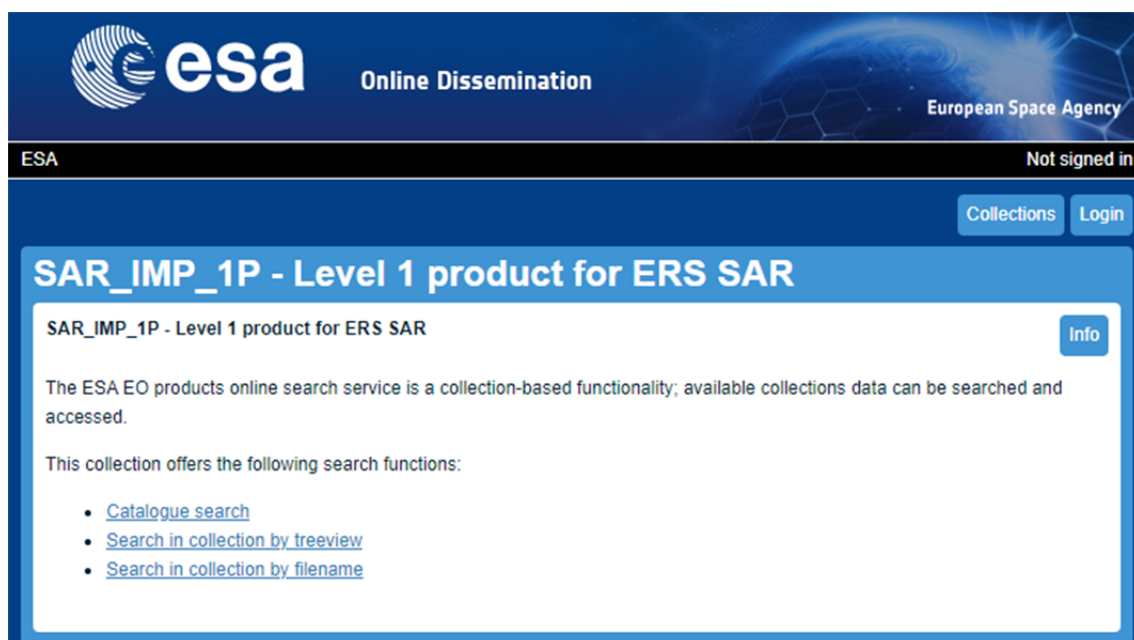


Figura 10. Web de la ESA para la descarga de imágenes ERS

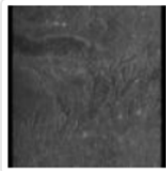
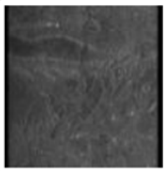
Para la realización del MDT_{ERS} se han buscado dos imágenes que tuviesen la menor diferencia temporal y al mismo tiempo no superasen la línea base crítica, que para estas imágenes, que han sido realizadas en la banda C, es de 1.000 metros.

De todos los pares de imágenes, hemos seleccionado un par con una línea base temporal de 35 días y una línea base perpendicular de 305 metros (Figura 11).

Hubiese sido más adecuada una línea base temporal más pequeña, de hecho hemos encontrado pares de imágenes con líneas temporales de hasta un día pero ninguno de esos pares tenía una línea base perpendicular adecuada. Todos ellos tenían una línea base perpendicular de escasos metros, lo que no nos permitiría recuperar la topografía.

SAR_IMS_1PNESA19980508_105858_00000015A032_00051_15937_0000
SAR_IMS_1PNESA19980612_105854_00000015A033_00051_16438_0000

[Download Master](#) | [Download Slave](#)



	master	slave
platformShortName	ERS	ERS
platformSerialIdentifier	2	2
beginAcquisition	1998-05-08T10:58:58.093Z	1998-06-12T10:58:54.672Z (35 days)
endAcquisition	1998-05-08T10:59:13.183Z	1998-06-12T10:59:09.762Z
orbitDirection	DESCENDING	DESCENDING
orbitNumber	15937	16438
track	51	51
frame	2835	2835
swathIdentifier	IS2	IS2
polarisationChannels	VV	VV
missionPhase	A	A
dopplerFrequency		
baselinePerpendicularOffset	778	1083 (-305)
footprint	38.7309 -4.255169 37.8474 -4.48446 9 37.6654 -3.395669 38.5489 -3.1532 69 38.7309 -4.255169	38.7309 -4.25537000001 37.8474 -4.48467000 001 37.6654 -3.39587000001 38.5489 -3.15347 000001 38.7309 -4.25537000001

Figura 11. Par de imágenes ERS seleccionadas

4.1.2.- Imágenes Sentinel-1

Estas imágenes se han obtenido de forma gratuita a través de la web de la ASF (Alaska SAR Facility) de la Universidad de Alaska, a través del siguiente enlace: <https://search.asf.alaska.edu/#/>.

Para la realización del MDT_SENTINEL-1, al igual que con las imágenes ERS, se han buscado un par imágenes que tuviesen la menor diferencia temporal y al mismo tiempo no superasen la línea base crítica, que para estas imágenes es de 5.000 metros.

Hay que apuntar que La misión Sentinel-1 no fue diseñada para la generación de MDT, sino para la detección de deformaciones (DInSAR). Por este motivo. La mayoría de las líneas de base entre dos imágenes consecutivas no alcanzan apenas un centenar de metros con carácter general (Figura nº12). Los pares de imágenes con líneas de base temporales cortas y líneas de base perpendiculares grandes son difíciles de encontrar.

Con ayuda de la aplicación **Línea base** de **ASF's Vertex** hemos localizado un par de imágenes de la zona con una línea base temporal de 36 días y una línea base perpendicular de 219 metros, que serán usadas para la elaboración de nuestro MDT (Figuras 12, 13 y 14).

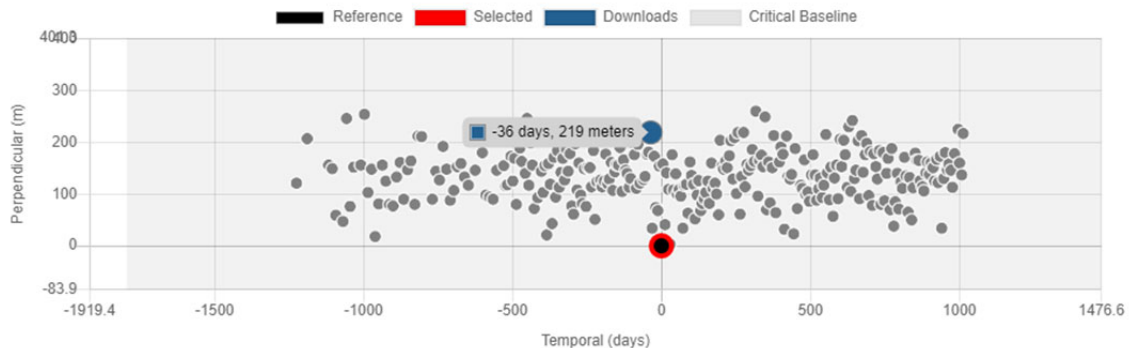


Figura 12. Gráfico obtenido por la aplicación Línea base

En el gráfico superior se aprecia que todas las imágenes disponibles tienen una línea base perpendicular de menos de 220 metros, lo que nos muestra que el objetivo de la misión Sentinel-1 no es la de obtener MDT sino la detección de deformaciones a través de DInSAR.

Imagen MASTER:

S1A_IW_SLC__1SDV_20180324T061842_20180324T061909_021153_0245C3_7999 

Sentinel-1 • C-Band

Perpendicular • 0

Temporal • 0

Start Time • 03/24/18, 06:18:42

Stop Time • 03/24/18, 06:19:09

Beam Mode • IW

Path • 81

Frame • 468

Flight Direction • DESCENDING

Polarization • VV+VH

Absolute Orbit • 21153

Data courtesy of ESA

Citation

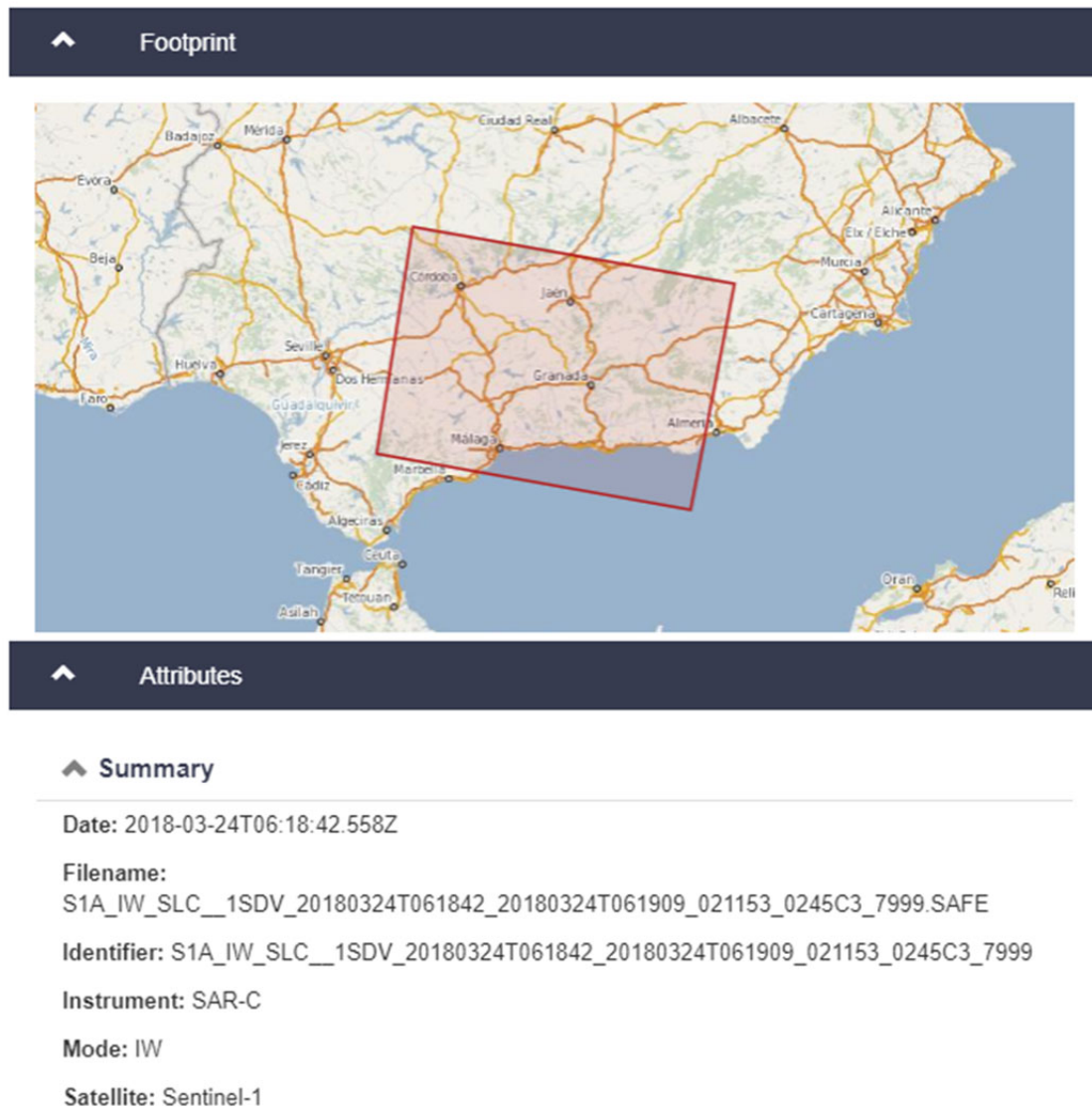


Figura 13. Imagen Sentinel-1 MASTER

Imagen SLAVE:

S1A_IW_SLC__1SDV_20180216T061842_20180216T061909_020628_02351B_7311 

Sentinel-1 • C-Band

Perpendicular • 219

Temporal • -36

Start Time • 02/16/18, 06:18:42

Stop Time • 02/16/18, 06:19:09

Beam Mode • IW

Path • 81

Frame • 468

Flight Direction • DESCENDING

Polarization • VV+VH

Absolute Orbit • 20628

Data courtesy of ESA

Citation

Footprint



Attributes

Summary

Date: 2018-02-16T06:18:42.423Z

Filename:

S1A_IW_SLC__1SDV_20180216T061842_20180216T061909_020628_02351B_7311.SAFE

Identifier: S1A_IW_SLC__1SDV_20180216T061842_20180216T061909_020628_02351B_7311

Instrument: SAR-C

Mode: IW

Satellite: Sentinel-1

Figura 14. Imagen Sentinel-1 SLAVE

Al igual que nos ha ocurrido con las imágenes ERS, para poder encontrar imágenes con una línea base perpendicular aceptable, hemos tenido que elegir un par de imágenes con una línea temporal de más de un mes.

4.1.3.- Imágenes ALOS

Estas imágenes se obtienen de forma gratuita a través de la web de la ESA (Agencia Espacial Europea), a través del siguiente enlace: <https://alos-palsar-ds.eo.esa.int/oads/access/> (Figura 15).

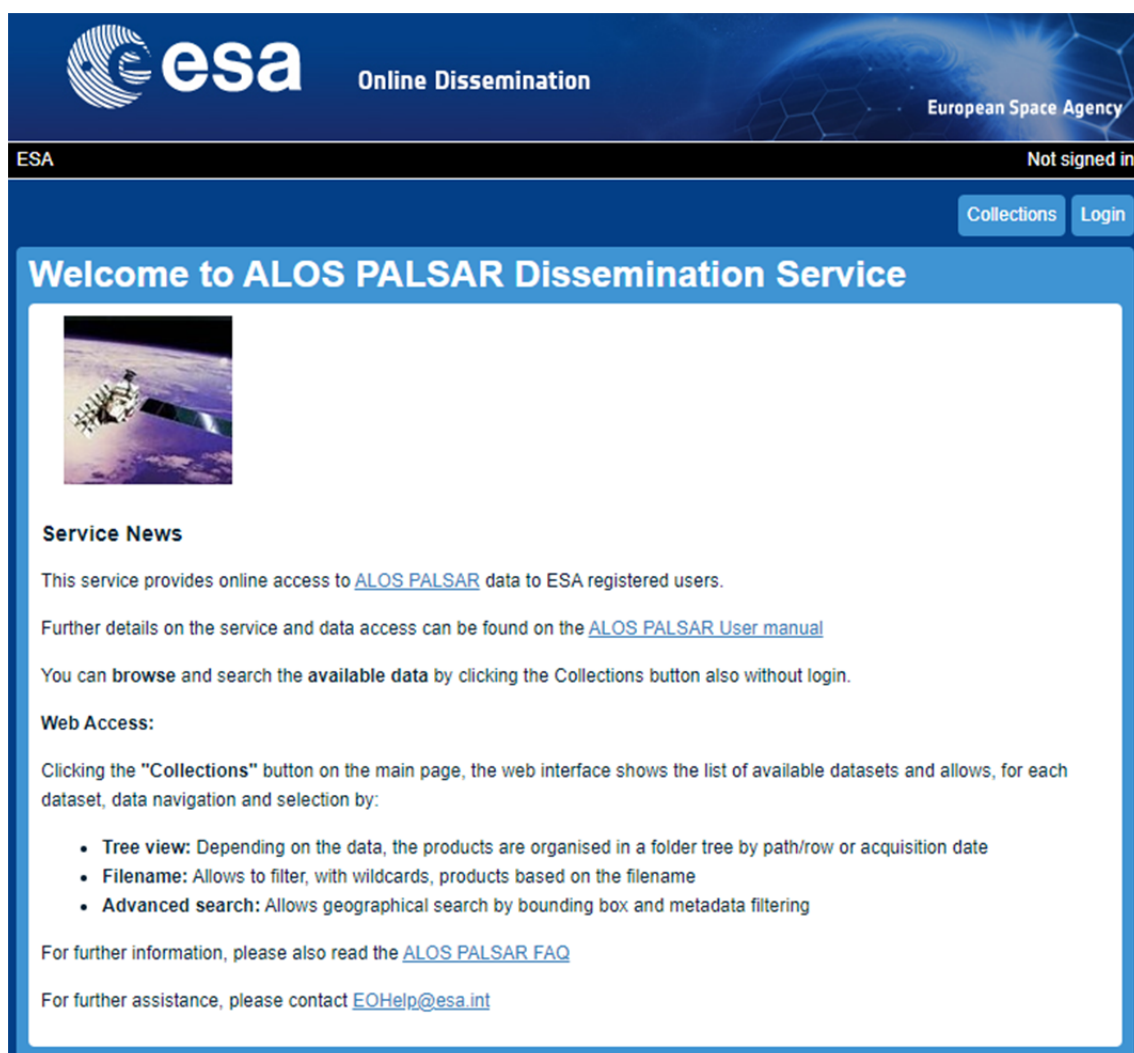


Figura 15. Web de la ESA para la descarga de imágenes ALOS PALSAR

Para la realización del MDT_ALOS, al igual que con las imágenes ERS Y Sentinel-1, se han buscado un par imágenes Sentinel-1 que tuviesen la menor diferencia temporal y al mismo tiempo no superasen la línea base crítica, que para estas imágenes que operan en la banda L, es de 14.600 metros.

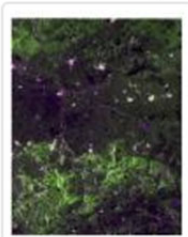
Para la elaboración de nuestro MDE hemos elegido dos imágenes con una diferencia temporal de 46 días y una línea base perpendicular de 532 metros (Figuras 16, 17 y 18).

Perp Baseline	532.7432861328125
Temp Baseline	-46.00012969970703
Modelled Coherence	0.5006007552146912
Height of Ambiguity	-117.82548522949219
Doppler Difference	-83.12666320800781

Figura 16. Líneas base temporal y perpendicular

AL1_OESA_FBD_SLC_1P_20090801T224233_20090801T224249_018757_0001_0740_0001

[Download Product](#) | [Product Info](#) | [Browse](#)

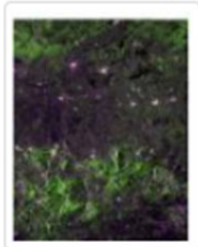


instrumentShortName	PALSAR
operationalMode	FBD
beginAcquisition	2009-08-01T22:42:33.142Z
endAcquisition	2009-08-01T22:42:49.542Z
wrsLongitudeGrid	1
wrsLatitudeGrid	740
orbitNumber	018757
orbitDirection	ASCENDING
polarisationChannels	HH, HV

Figura 17. Imagen ALOS Master

AL1_OESA_FBD_SLC_1P_20090916T224244_20090916T224300_019428_0001_0740_0001

[Download Product](#) | [Product Info](#) | [Browse](#)



instrumentShortName	PALSAR
operationalMode	FBD
beginAcquisition	2009-09-16T22:42:44.245Z
endAcquisition	2009-09-16T22:43:00.644Z
wrsLongitudeGrid	1
wrsLatitudeGrid	740
orbitNumber	019428
orbitDirection	ASCENDING
polarisationChannels	HH, HV

Figura 18. Imagen ALOS Slave

4.2.- Procesamiento de Imágenes con SNAP

El procesado de las imágenes Radar para la obtención de los MDT, se puede realizar a través del programa gratuito **SNAP** de la ESA (Agencia Espacial Europea) en su **versión 8.0** (Figura 19). Este programa nos permitirá realizar todos los pasos necesarios para la obtención del MDT y una vez terminado nos permite su exportación en diferentes formatos.



Figura 19. Software SNAP

A continuación (Figura 20) se muestran los pasos necesarios para la obtención de un MDT a partir de imágenes radar y que serán realizados con el programa SNAP.

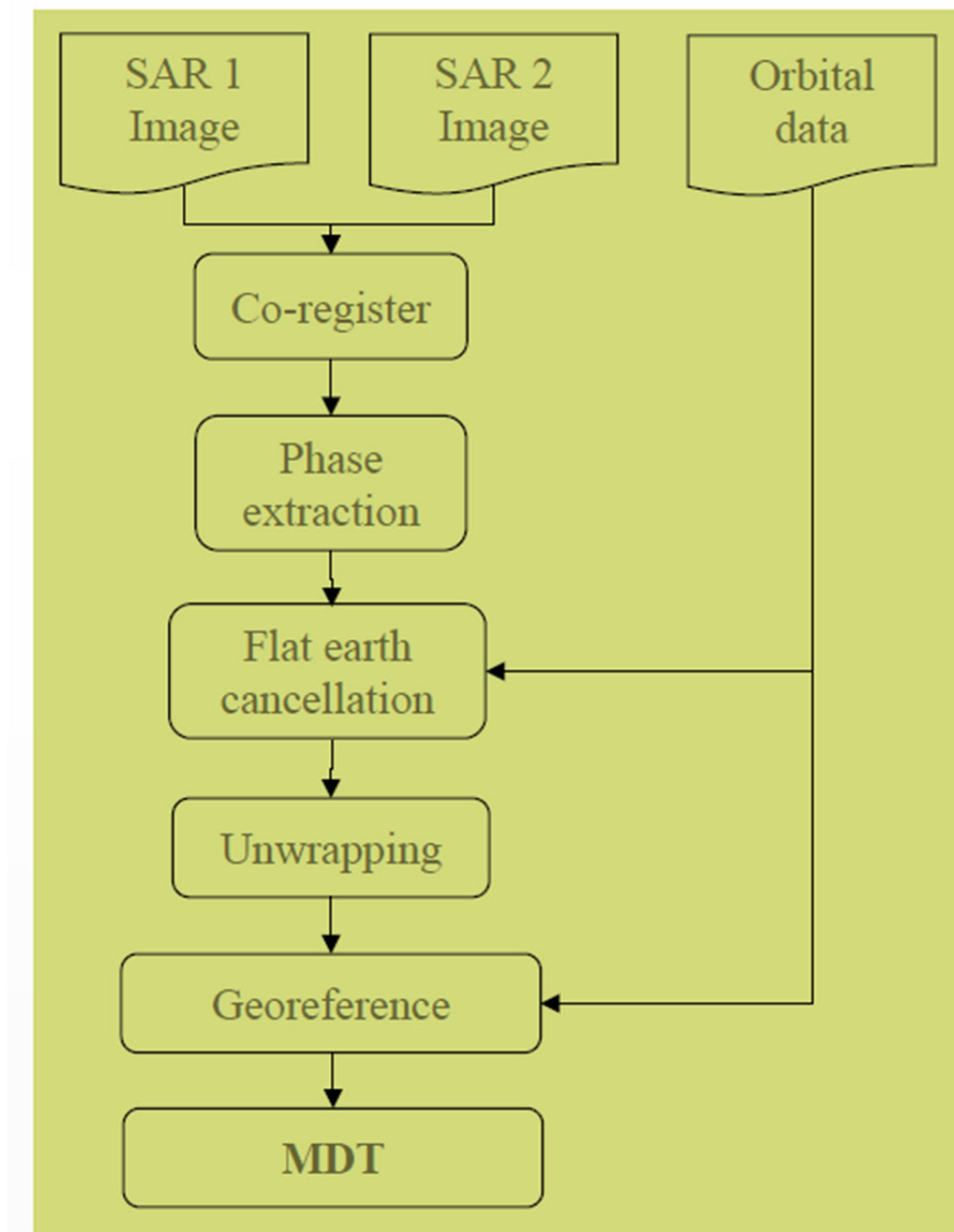


Figura 20. Diagrama de flujo para la realización de un MDT con imágenes Radar

Todos estos pasos tendrán alguna pequeña diferencia en su realización, dependiendo si las imágenes procesadas son ERS, Sentinel-1 o ALOS, y serán comentadas en su momento.

4.2.1.- Corregistro de las imágenes

Para aprovechar la diferencia de fase de las dos imágenes, primero se debe crear una imagen que contenga ambos productos. El corregistro realiza un proceso estadístico de las imágenes para alinearlas con una precisión de subpíxeles.

Mientras que las imágenes radar Stripmap tales como las obtenidas por ERS y ALOS se pueden corregistrar en un solo paso, los productos Sentinel-1 TOPSAR (Figura 21) requieren realizar un paso anterior, debido a su forma especial de adquisición.

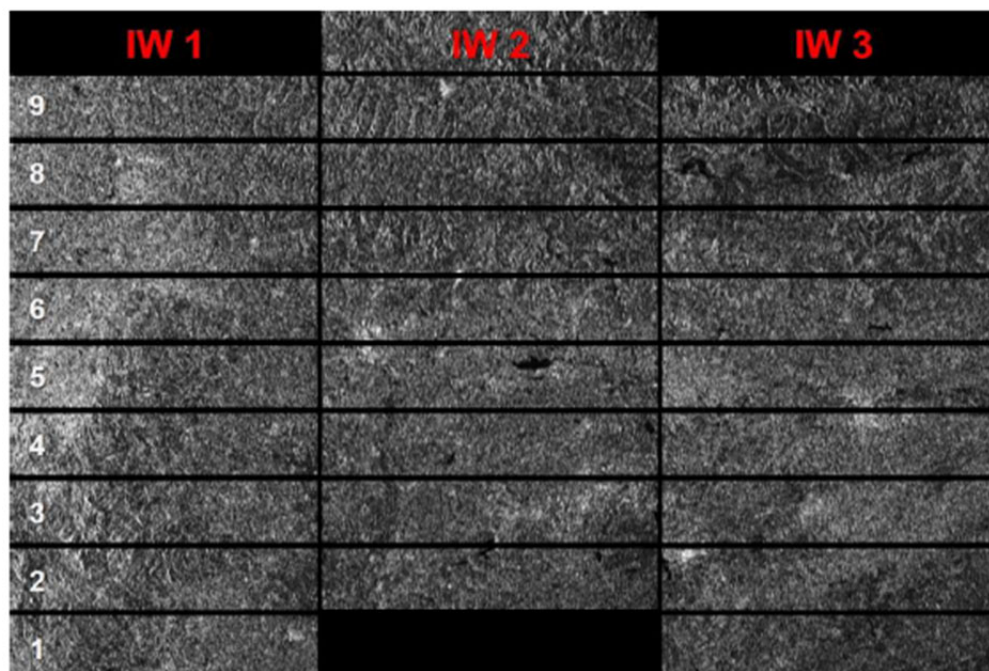


Figura 21. Detalle imagen Sentinel-1 TOPSAR

Las imágenes Sentinel-1 TOPSAR constan de tres sub-franjas de imagen por canal de polarización, para un total de tres (polarizaciones simples) o seis (polarización dual) imágenes en un producto IW. Cada sub-franja consta de una serie de ráfagas, donde cada ráfaga se ha procesado como una imagen SLC separada. A la hora de realizar el correregistro de las imágenes Sentinel-1 debemos elegir cuales necesitamos y unirlos por medio del comando *TOPS Split* del software SNAP. Este proceso solo es necesario realizarlo con las imágenes Sentinel-1

4.2.2.- Descargar información de la órbita

Los datos de la órbita contienen información sobre la posición del satélite durante la adquisición de datos SAR. Estos datos de órbitas precisas se descargan automáticamente para las imágenes ERS y Sentinel-1 y se agregan a los metadatos de las imágenes ejecutando la opción *Apply Orbit File* del software SNAP.

Para las imágenes ALOS no es necesario descargar la información de la órbita, ya que esa información se encuentra incluida en el fichero de imagen.

4.2.3.- Creación del interferograma

Un interferograma se forma multiplicando de forma cruzada la imagen master con el complejo conjugado de la imagen slave. La amplitud de ambas imágenes se multiplica mientras que la fase representa la diferencia de fase entre las dos imágenes.

La fase interferométrica de cada píxel de la imagen SAR dependería únicamente de la diferencia en las trayectorias desde cada uno de los dos SAR hasta la celda de resolución considerada. En consecuencia, el interferograma calculado contiene una variación de fase ϕ en el que contribuyen varios factores, el más importante es la fase de tierra plana ϕ_{flat} (curvatura de la tierra), la fase topográfica ϕ_{DEM} (superficie topográfica de la tierra), condiciones atmosféricas ϕ_{Atm} (cambio de

humedad, temperatura y presión entre las dos adquisiciones) y el ruido ϕ_{noise} (cambio de los dispersores, diferente ángulo de incidencia, etc.), y la posible deformación de la superficie terrestre ocurrida entre las dos adquisiciones ϕ_{disp} (Figura 22).

$$\phi = \phi_{\text{DEM}} + \phi_{\text{flat}} + \phi_{\text{disp}} + \phi_{\text{atm}} + \phi_{\text{noise}}$$

$$\begin{aligned} & \boxed{-\frac{4\pi}{\lambda} \frac{B_n s}{R \tan \theta}} \quad \boxed{-\frac{\Delta q}{\sin \theta} \cdot \frac{B_n}{R_0} \cdot \frac{4\pi}{\lambda}} \quad \boxed{+\frac{4\pi}{\lambda} d} \end{aligned}$$

Figura 22. Contribuciones a la fase interferométrica

La interferometría SAR intenta estimar la superficie terrestre (ϕ_{flat} y ϕ_{DEM}) que se considera igual para ambas adquisiciones de imágenes y deriva en la superficie topografía.

Si las contribuciones atmosféricas ϕ_{atm} y el ruido ϕ_{noise} se mantienen lo más pequeños posible y no se ha producido deformación en la corteza terrestre ϕ_{disp} entre la adquisición de la primera y la segunda imagen, se obtendría un MDT de calidad. Por este motivo es muy importante que la línea base temporal sea lo menor posible para que las condiciones atmosféricas y la superficie de la tierra sean lo más parecidas.

$$\phi_{\text{DEM}} = \phi - \phi_{\text{flat}} - \phi_{\text{disp}} + \phi_{\text{atm}} + \phi_{\text{noise}}$$

En este paso también se resta la fase de tierra plana ϕ_{flat} : La fase de tierra plana es la fase presente en la señal interferométrica debida a la curvatura de la tierra. La fase de tierra plana se estima utilizando la información de datos orbitales y se resta del interferograma. De este modo obtendríamos el MDT:

$$\phi_{DEM} = \phi$$

4.2.4.- Filtrado de fase Goldstein

La fase interferométrica puede corromperse por el ruido de la descorrelación temporal y geométrica, la dispersión y otros errores de procesamiento. La información de fase en áreas descorrelacionadas no se puede restaurar, pero la calidad de las franjas existentes en el interferograma se puede aumentar aplicando filtros de fase especializados.

A nuestros interferogramas le aplicamos el filtro Goldstein que usa una Transformación Rápida de Fourier (FFT) para mejorar la relación señal-ruido de la imagen.

4.2.5.- Desenvolver la fase (Unwrapping)

En el interferograma, la fase interferométrica es ambigua y solo se conoce dentro de la escala de 2π . Para poder relacionar la fase interferométrica con la altura topográfica, primero se debe desenvolver la fase.

Para desenvolver la fase tenemos que resolver esta ambigüedad integrando la diferencia de fase entre píxeles vecinos. Después de eliminar cualquier número entero de altitudes de ambigüedad (equivalente a un número entero de ciclos de fase 2π), la variación de fase entre dos puntos en el interferograma aplanado proporciona una medida de la variación de altitud real (Figura 23). En consecuencia, los resultados sin envolver deben interpretarse como un desplazamiento relativo entre píxeles de dos imágenes.

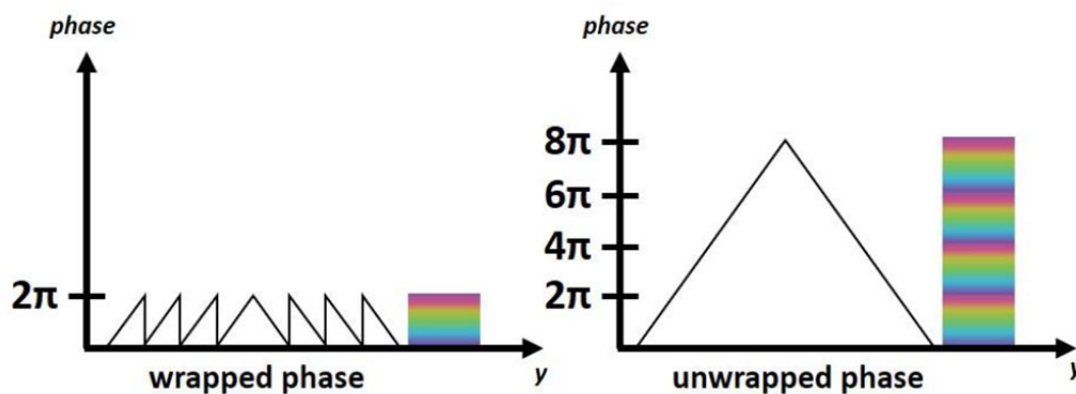


Figura 23. Principio de desenrollado de la fase

4.2.6.- Transformar de fase a elevación

La fase desenvuelta es ahora un ráster continuo, pero aún no es una medida métrica. Para convertir las unidades en radianes a alturas absolutas, se aplica un proceso en SNAP llamado Fase a Elevación. Este proceso traduce la fase en radianes a alturas en metros a lo largo de la línea de visión (LOS). El LOS es la línea entre el sensor y un píxel. En este proceso se utiliza un DEM para obtener los valores de elevación correctos. En nuestro proceso, hemos utilizado el DEM **SRTM 1Sec HGT** como entrada.

En este proceso se aplica a la fase desenrollada que se importó en el último paso. Esto produce una salida similar a la fase desenrollada, pero ahora cada píxel tiene un valor métrico que indica su altura sobre el nivel del mar.

4.2.7.- Corrección de terreno (Georreferenciar)

En este proceso se corrige en la imagen las distorsiones geométricas del SAR utilizando un modelo de elevación digital (DEM), obteniendo un producto proyectado.

La codificación geográfica convierte la imagen con la geometría de rango inclinado en una imagen en un sistema de coordenadas de mapa. Esto implica el uso de un modelo digital de elevaciones (DEM) para corregir las distorsiones geométricas inherentes (Figura 24) como el escorzo (foreshortening), el relieve invertido (layover) y la sombra (shadow).

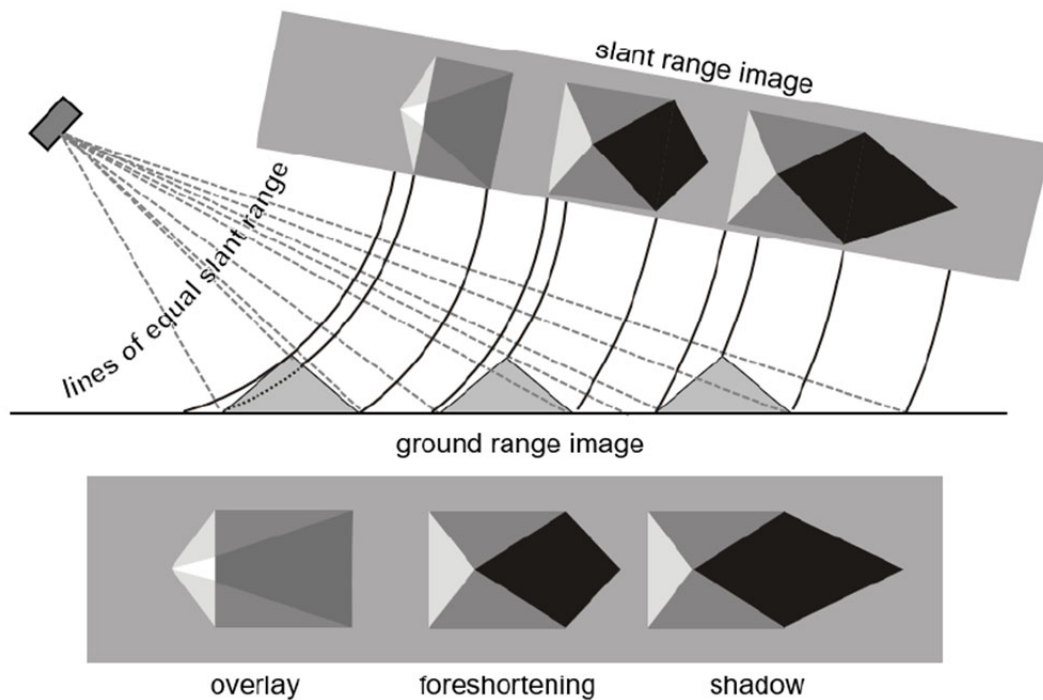


Figura 24. Distorsiones geométricas en una imagen radar

4.2.8.- Resultados del procesado

Una vez realizado el proceso con SNAP obtenemos tres MDT a partir de pares de imágenes de tres satélites diferentes. Estos antes de ser usados en la modelización, serán comparados con el MDT Lidar que hemos tomado como referencia.

Podemos comprobar en la página siguiente, que no se observa un buen resultado en los modelos obtenidos con ERS y Sentinel-1. Por el contrario el modelo ALOS presenta algo más de coherencia pero esto será comparado y comentado posteriormente con los resultados obtenidos de Lidar, que es el modelo que hemos tomado como referencia (Figura 25).

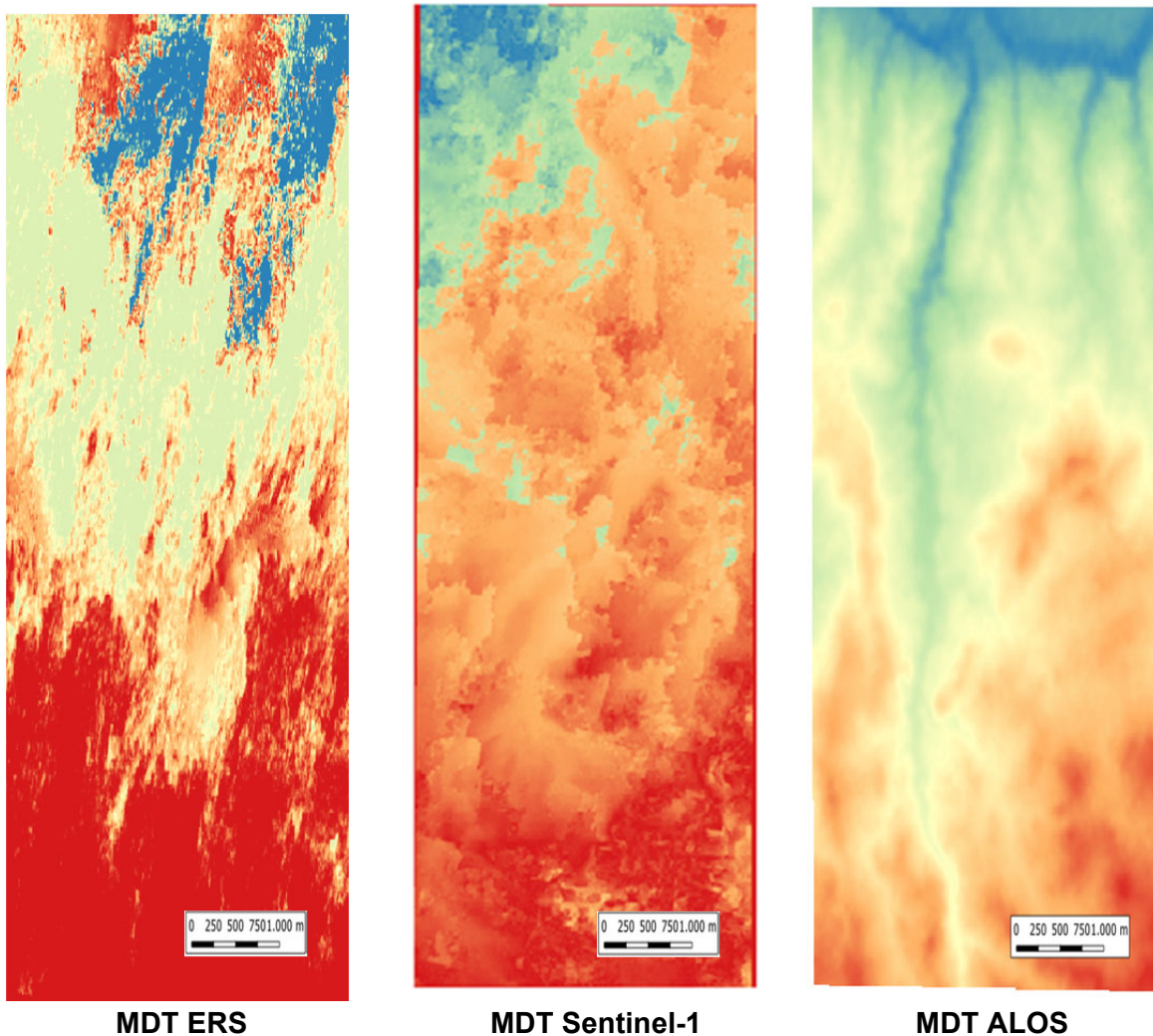


Figura 25. MDT obtenidos con imágenes ERS, Sentinel-1 y ALOS

4.3.- Obtención del MDT SRTM

El MDT SRTM podemos obtenerlo ya procesado a través de diversos modos. Para este TFM se ha obtenido a partir del complemento *SRTM Downloader* de QGIS (Figuras 26 y 27), simplemente indicándole la zona de estudio y pulsando descargar.

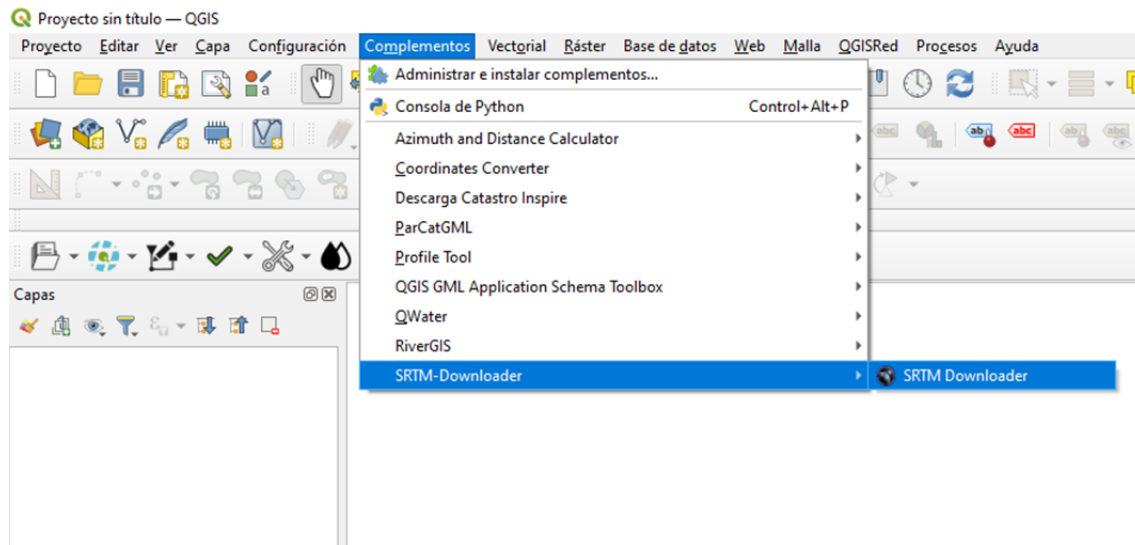


Figura 26. Complemento de QGIS SRTM Downloader

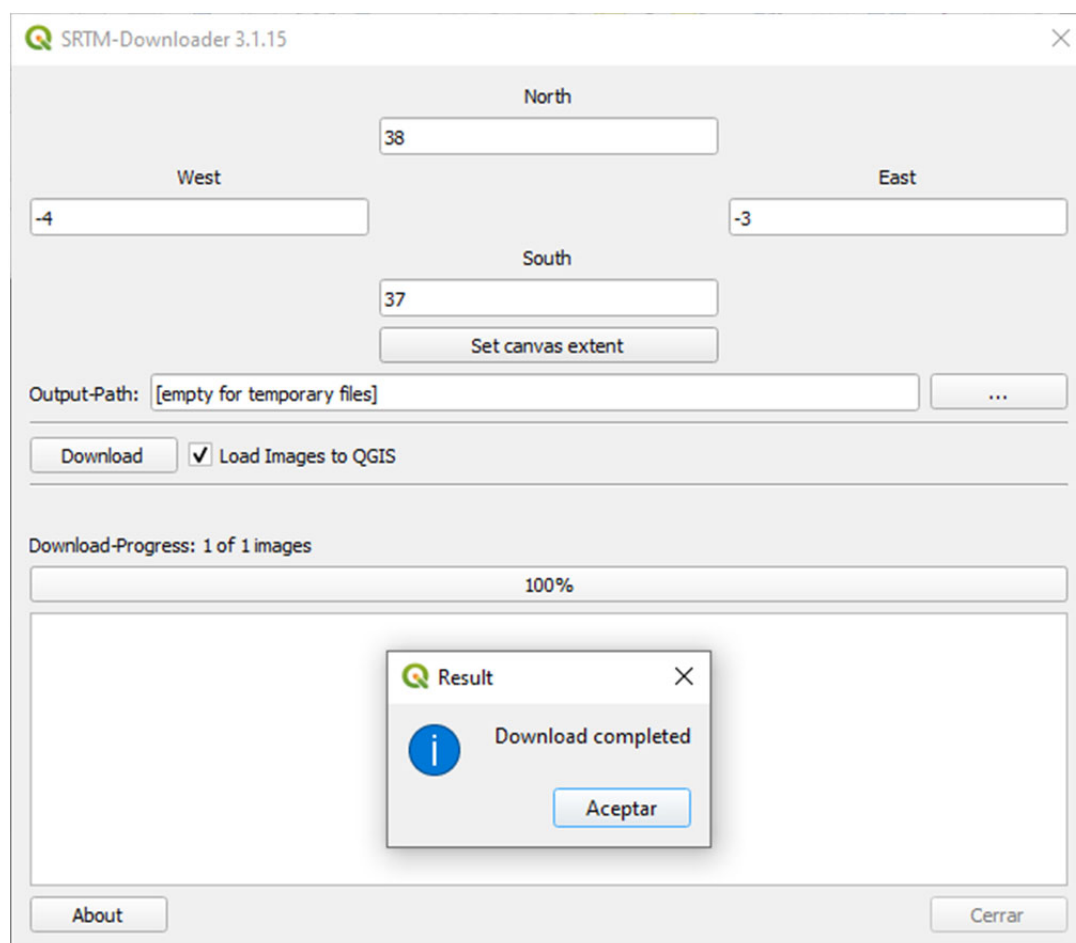


Figura 27. Detalle descarga MDT con SRTM Downloader

4.4.- Obtención del MDT LIDAR

El MDT Lidar se obtiene directamente de la página Web del Instituto geográfico Nacional (Figura 28). Se descarga el MDT con malla de paso 5x5 de la hoja de nuestra zona de estudio, que en nuestro caso es la número 926 y una vez descargada, se genera el MDT con el programa QGIS.



MDT05 1ª COBERTURA

Modelo Digital del Terreno - MDT05

Descripción: modelo digital del terreno 1ª Cobertura con paso de malla de 5 m.

SGR: ETRS89 en la Península, Islas Baleares, Ceuta y Melilla, y REGCAN95 en las Islas Canarias (ambos sistemas compatibles con WGS84). Proyección UTM en el huso correspondiente. También huso 30 extendido para hojas en los husos 29 y 31. Alturas ortométricas.

Ud. descarga: hojas del MTN50

Formato: ASCII matriz ESRI (.asc)

[Ver +](#)
[Metadatos](#)
[Información auxiliar](#)

Todos Por listado Por mapa

Figura 28. Descarga MDT Lidar (Web del IGN)

4.5.- Discusión y análisis de los distintos resultados

Una vez obtenidos los distintos MDT con ERS, Sentinel-1, ALOS y SRTM, procedemos a realizar una comparación de estos con el modelo Lidar.

En primer lugar comparamos los resultados de ERS y Sentinel-1 con Lidar (Figura 29) y observamos que no hay mucha similitud:

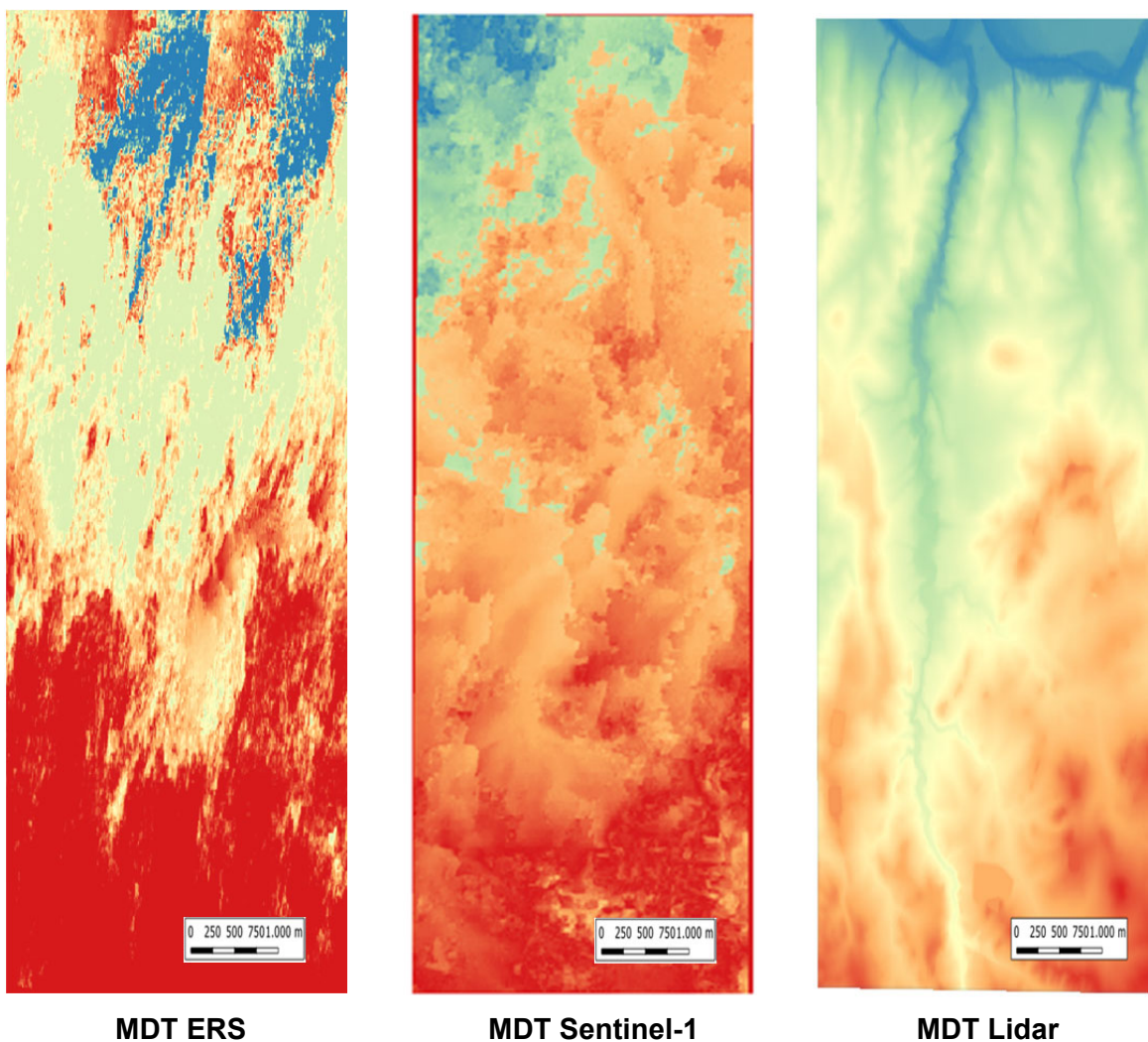


Figura 29. MDT obtenidos con imágenes ERS, Sentinel-1 y Lidar

La mala calidad de los MDT obtenidos por imágenes de estos dos satélites puede ser debido a la corta longitud de onda de la banda C (banda que usan los satélites ERS y Sentinel-1), lo que hace que rebote la señal en las hojas de los árboles y no llegue a penetrar en el suelo. Más en una zona como la del estudio, cubierta por olivar. Es por esto que nos lleva a desechar estos MDT para la simulación hidráulica.

Por el contrario, los MDT obtenidos por el satélite ALOS y por la misión SRTM (Figura 30) se asemejan mucho al MTR Lidar:

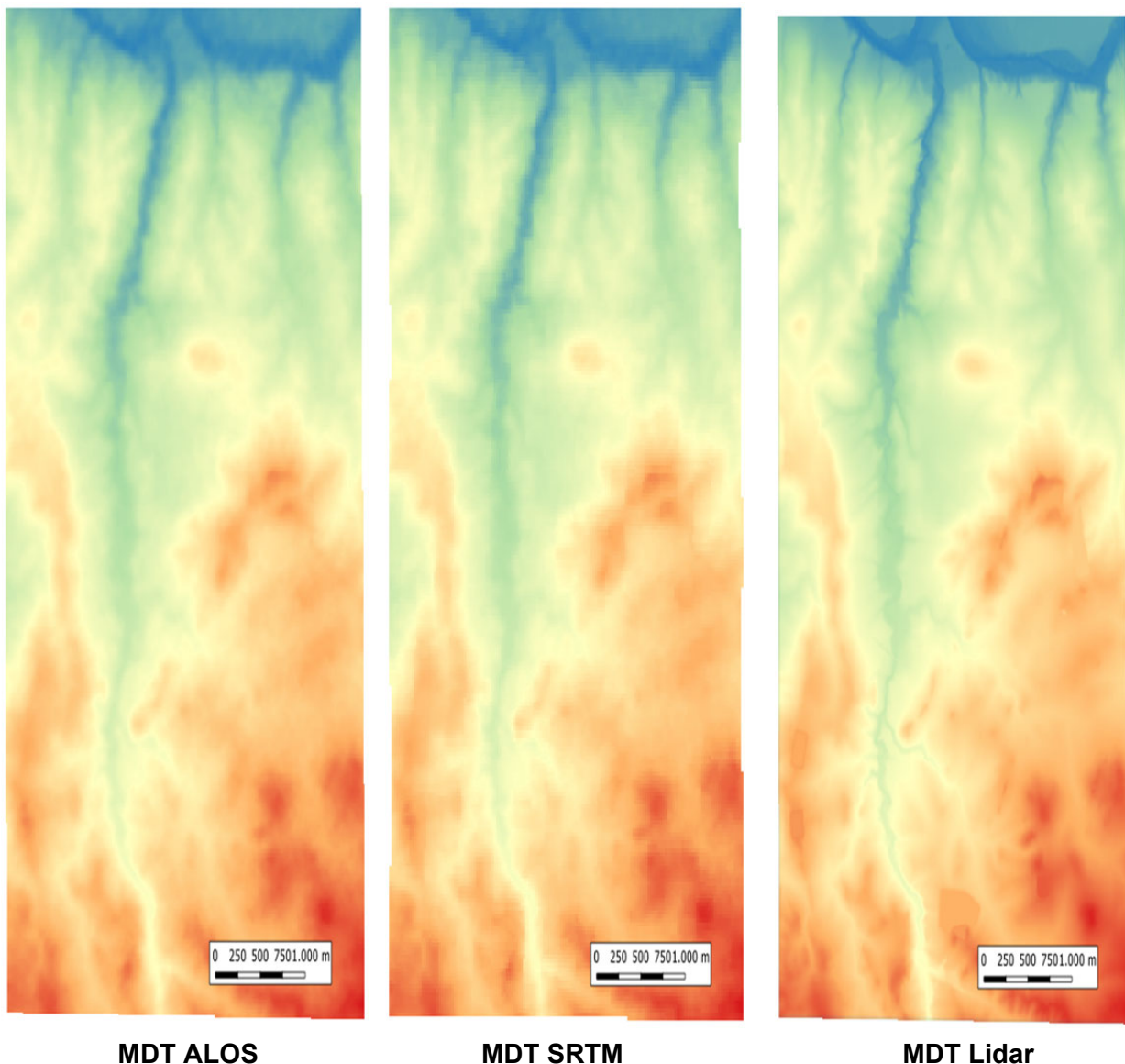
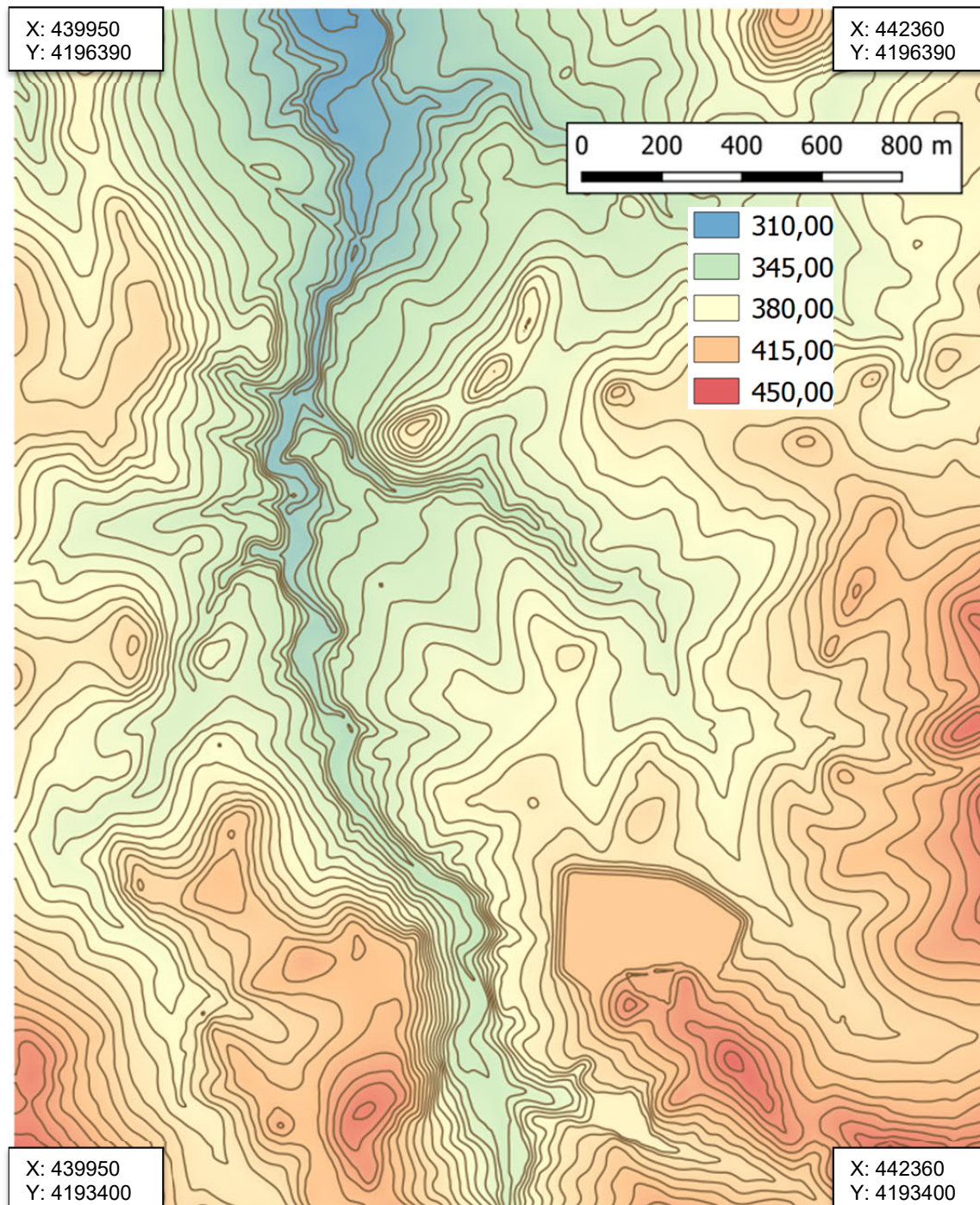


Figura 30. MDT obtenidos con imágenes ALOS, SRTM y Lidar

A continuación se muestran los MDT recortados con la zona exacta de estudio y con las curvas de nivel con una equidistancia de 5 metros (Figuras 31, 32 y 33):



*Figura 31. MDT y curvado Lidar
Se indican las coordenadas UTM huso 30N de las esquinas de la imagen*

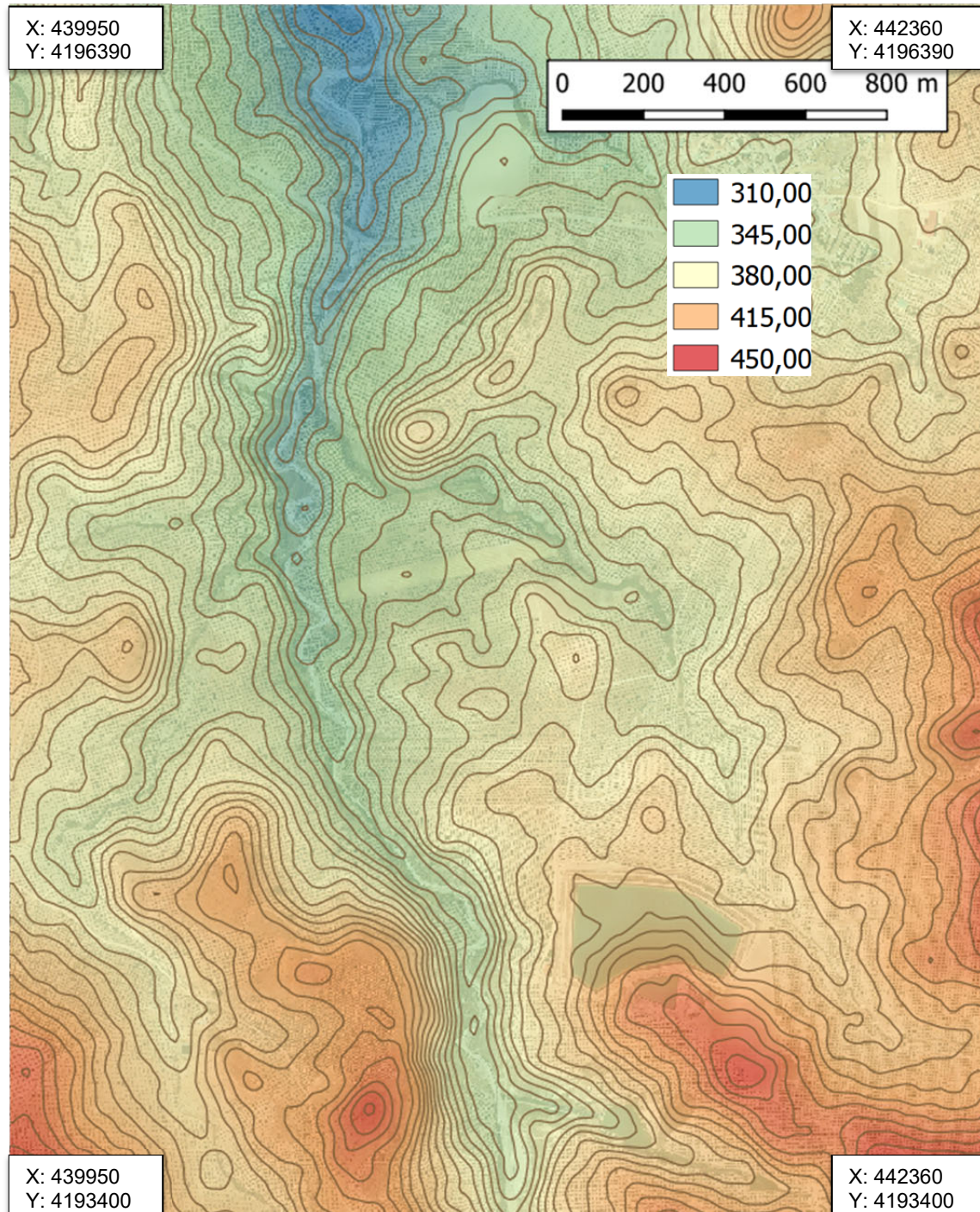


Figura 32. MDT y curvado ALOS

Se indican las coordenadas UTM huso 30N de las esquinas de la imagen

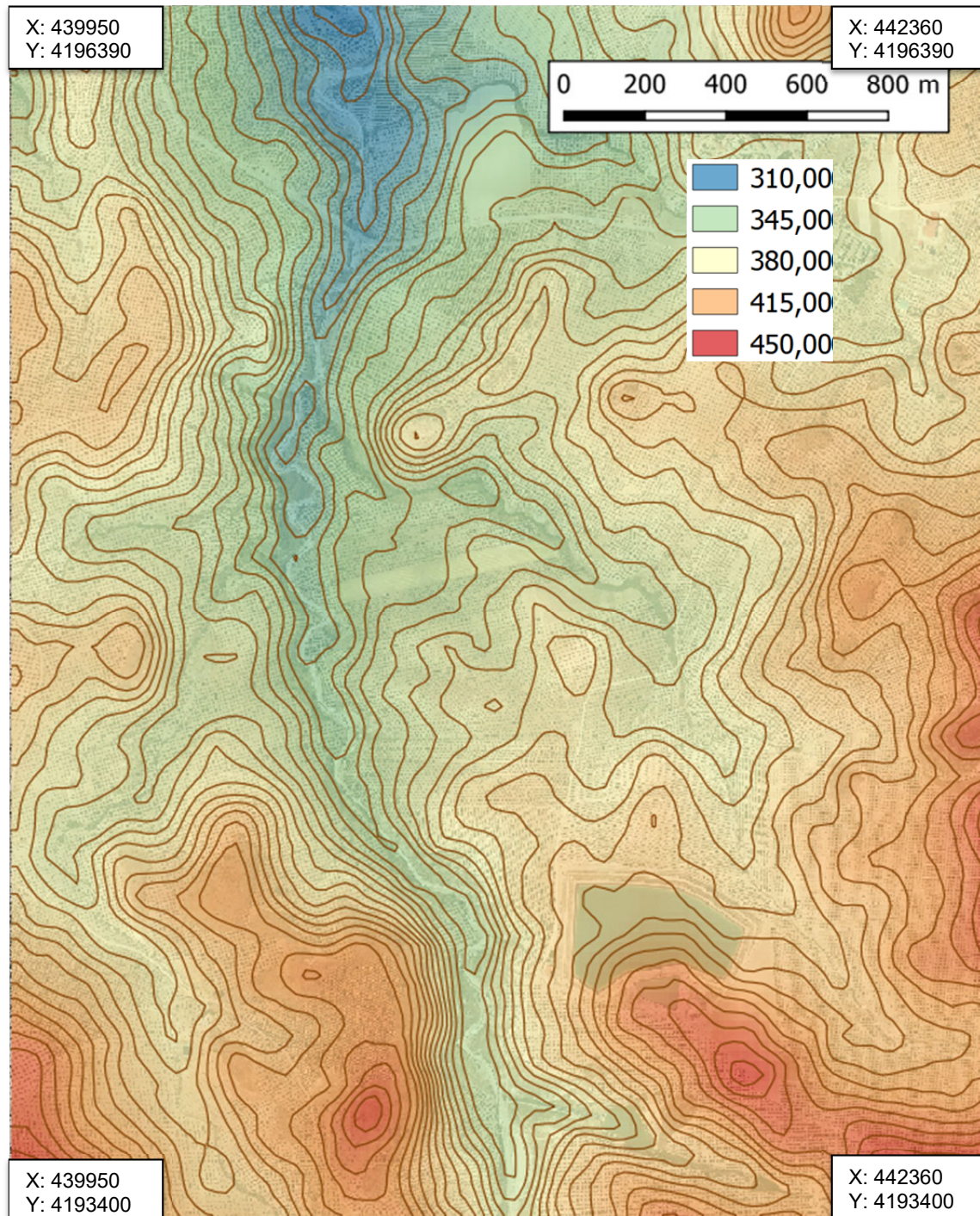


Figura 33. MDT y curvado STRM

Se indican las coordenadas UTM huso 30N de las esquinas de la imagen

En la Figura 34 se muestran superpuestas las curvas de nivel de los diferentes modelos digitales del terreno, en ella se observan las ligeras diferencias que existen:

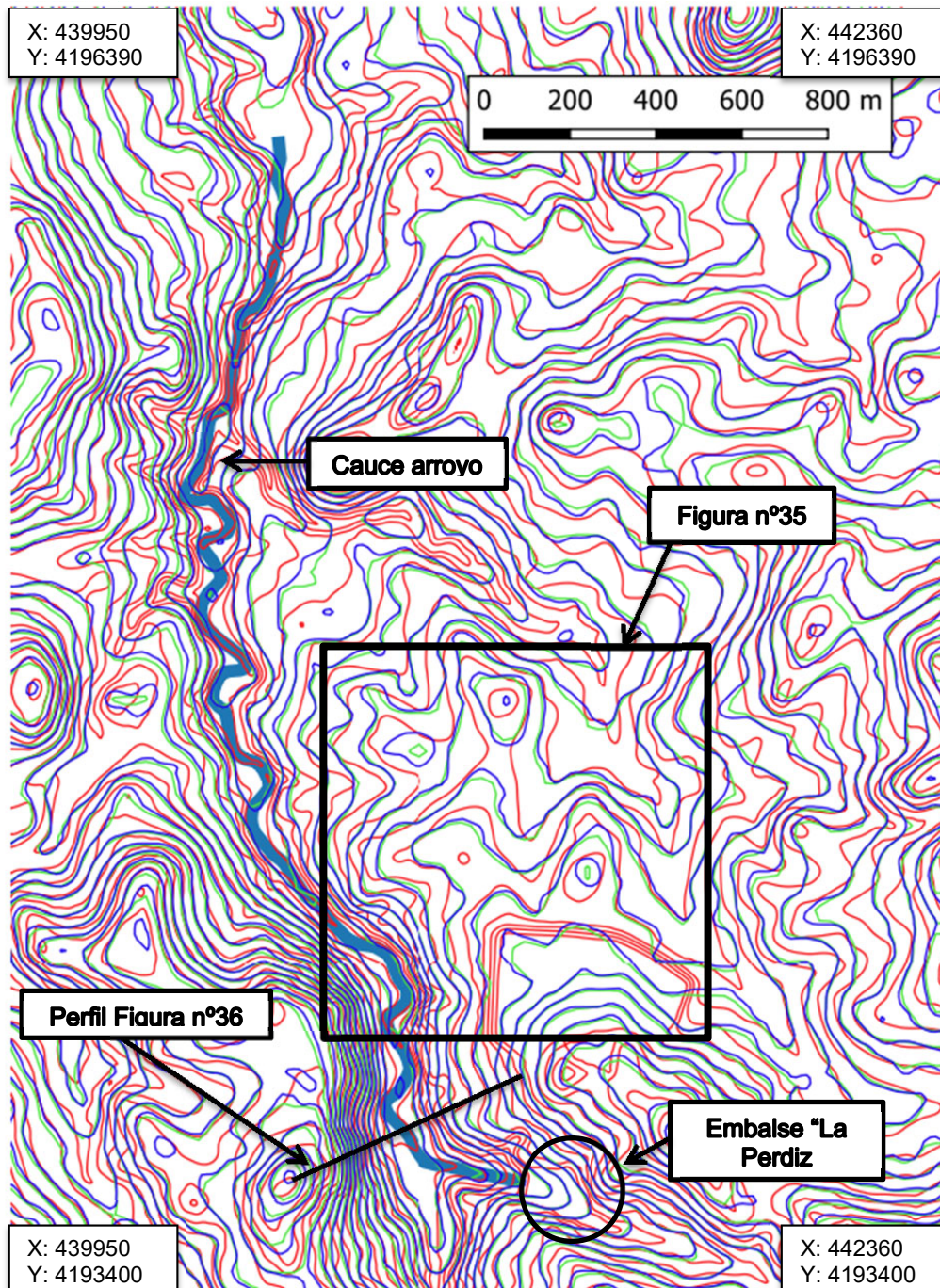
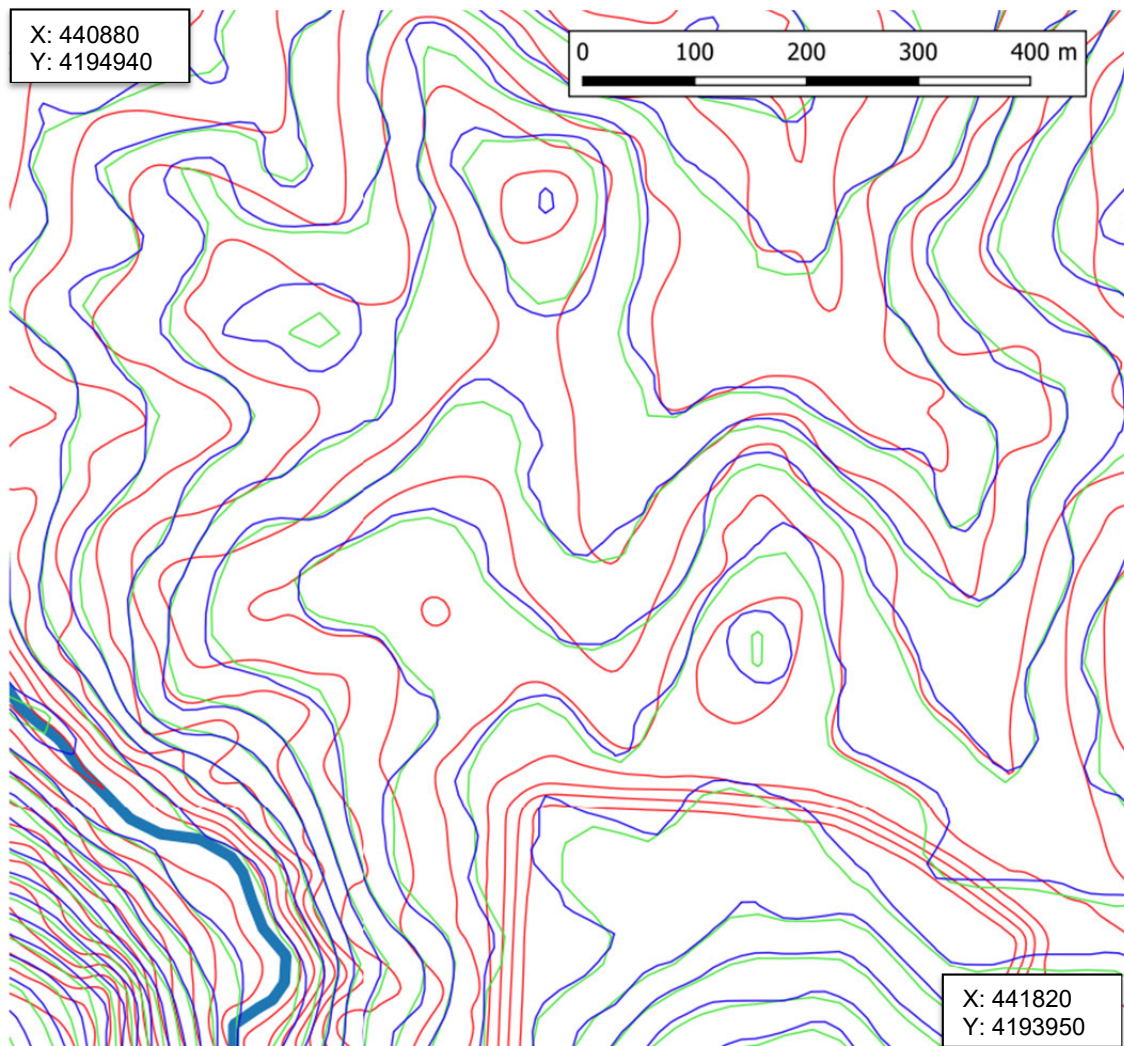


Figura 34. Curvado (equidistancia 5 m). Rojo Lidar, azul ALOS y verde SRTM
Se indican las coordenadas UTM huso 30N de las esquinas de la imagen

En la Figura 35 mostramos una ampliación del curvado de la Figura 34. En ella se pueden observar con más detalle los ligeros



*Figura 35. Ampliación Figura nº35. Rojo Lidar, azul ALOS y verde SRTM
Se indican las coordenadas UTM huso 30N de las esquinas de la imagen*

Como puede observarse hay ligeras diferencias entre los tres MDT. Una diferencia destacable es que el MDT Lidar refleja el curvado de un embalse y los otros dos no lo reflejan.

A continuación (Figura 36) se muestra un perfil longitudinal con los MDT ALOS, SRTM y Lidar:

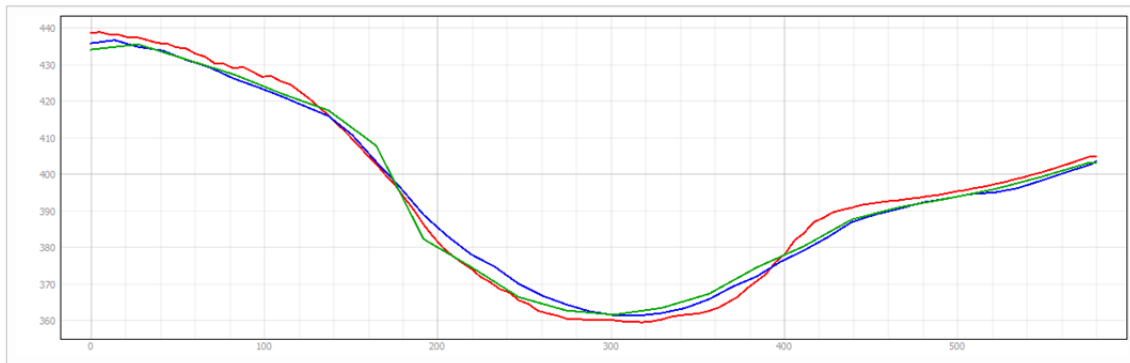


Figura 36. Lidar (rojo), ALOS (verde), SRTM (azul)

Como puede observarse en la Figura nº36, las diferencias son pequeñas en la mayor parte del perfil. Estos serán los tres MDT que usaremos en la simulación hidráulica. En la simulación comprobaremos si esas ligeras diferencias pueden variar o no el resultado a la hora de clasificar el embalse en función de su riesgo potencial.

5.- Estudio hidráulico

Una vez descartados y elegidos los MDT que serán usados en el modelado, procedemos a realizar el estudio de inundabilidad.

5.1.- Introducción

A continuación se realizan tres estudios de inundabilidad para su clasificación en función del riesgo potencial del mismo embalse con la única diferencia de que en cada uno de ellos se va a utilizar como base un modelo digital del terreno diferente. Se toma como referencia el estudio realizado con el modelo digital del terreno de Lidar y se comparan los resultados obtenidos usando los MDT ALOS y SRTM.

5.2.- Objeto del estudio de inundabilidad para un embalse

El objetivo fundamental de un estudio de inundabilidad de un embalse es para la clasificación, atendiendo a su riesgo potencial, en el hipotético caso de que el mismo no fuese capaz de soportar las tensiones provocadas por la acumulación de agua en el embalse, o bien, porque el agua embalsada sobrepase la coronación, con lo cual, por tratarse de balsas de materiales sueltos, se rompería progresivamente.

La *Directriz Básica de Planificación de Protección Civil ante el riesgo de inundaciones*, aprobada por *Acuerdo del Consejo de Ministros del día 9 de diciembre de 1994* y publicada en el Boletín Oficial del Estado de fecha 14 de febrero de 1995, establece en su artículo 3.5.1.3. la obligatoriedad de que las presas se clasifiquen en categorías en función del riesgo potencial que pueda derivarse de su rotura o funcionamiento incorrecto.

De acuerdo con lo indicado en el citado artículo 3.5.1.3, la clasificación se efectuará mediante resolución de la *Dirección General de Obras Hidráulicas* o de los Órganos de las Comunidades Autónomas que ejerzan competencias sobre el dominio público hidráulico, para aquellas presas que se ubiquen en cuencas hidrográficas comprendidas íntegramente dentro de su territorio. Los propietarios o concesionarios de presas deberán enviar al órgano competente para resolver su propuesta de clasificación de la presa respecto al riesgo, acompañada de la información necesaria para que dicho Órgano decida acerca de la clasificación que corresponda.

5.2.1.- Niveles de clasificación

Atendiendo a la *Orden Ministerial de 12 de marzo de 1996, por la que se aprueba el Reglamento Técnico sobre Seguridad de Presas y Embalses*, publicada en el Boletín Oficial del Estado de fecha 30 de marzo de 1996, los embalses se clasifican en función del riesgo potencial derivado de su posible rotura o funcionamiento incorrecto en tres categorías en función de las posibles afecciones a la población, servicios esenciales y bienes materiales y medioambientales, estas categorías son las siguientes:

Categoría A: Corresponde a las presas cuya rotura o funcionamiento incorrecto puede afectar gravemente a núcleos urbanos o servicios esenciales, o producir daños materiales o medioambientales muy importantes o afectar a un reducido número de viviendas.

Categoría B: Corresponde a las presas cuya rotura o funcionamiento incorrecto puede ocasionar daños materiales o medioambientales importantes.

Categoría C: Corresponde a las presas cuya rotura o funcionamiento incorrecto puede producir daños materiales de moderada importancia y solo incidentalmente pérdida de vidas humanas. En todo caso a esta categoría pertenecerán todas las presas no incluidas en las Categorías A o B.

Como se indicaba en la introducción, uno de los objetivos de este TFM es el de obtener la clasificación en función del riesgo potencial del embalse con los diferentes modelos digitales del terreno y comprobar si el resultado obtenido es el mismo o no.

5.3.- Simulación

5.3.1- Elección del modelo

Existen diversos métodos para el estudio de la formación y propagación de las ondas de rotura de embalses, siendo los más utilizados para este tipo de estudios los siguientes:

- Método completo
- Método simplificado de modelización
- Método mixto hidrológico-hidráulico
- Método simplificado de las curvas envolventes

El método empleado en el presente TFM es el **método completo**, también denominado como *método de modelos hidráulicos completos*.

Elegimos este método por ser el más preciso y el único que considera las características reales del movimiento en régimen variable de la propagación de la onda de rotura, así como los posibles efectos de las secciones hidráulicas agua abajo en la propagación agua arriba del movimiento. Por ello, en general, es el método recomendable para el análisis de la clasificación de los embalses.

Utiliza procedimientos hidráulicos de análisis de régimen variable para el estudio del avance de la onda de rotura y la determinación de las áreas de inundación. También proporciona directamente resultados en términos de cota máxima de lámina alcanzada y velocidad del agua, por lo que la determinación del área inundada y de las características de la inundación es directa.

La simulación hidráulica se realiza con el software **HEC-RAS**, del Cuerpo de Ingenieros de los EEUU en su versión 4.1.0 (Figura 37). Este software se puede descargar gratuitamente en la web <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/>.

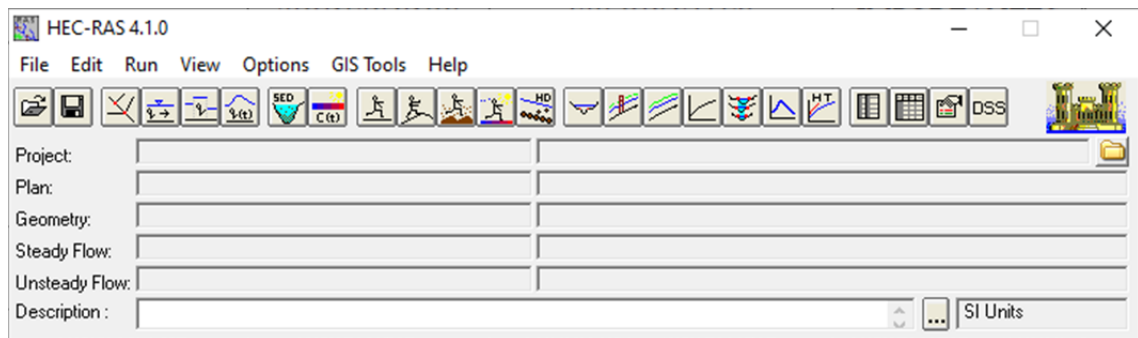


Figura 37. Pantalla principal del software HEC-RAS

5.3.2- Datos de entrada

Cuenca: Guadalquivir

CCAA: Andalucía

Provincia: Jaén

Coordenadas UTM (ETRS89) del embalse:

- X: 441464

- Y: 4193625

Cotas del embalse:

- Coronación: 391

- Fondo: 384

- Cauce: 379

Altura de la presa: 12 m

Profundidad: 7 m

Longitud de coronación: 66 m

Capacidad máxima: 48.644 m³

Forma, dimensiones de la brecha y tiempo de rotura:

El modo de rotura y la forma y evolución de la brecha dependen del tipo de embalse. En las balsas de materiales sueltos, la rotura es progresiva en el tiempo y con una evolución que va desde formas geométricas iniciales hasta la práctica totalidad de la balsa.

El modelo más usual que se emplea para la simulación de fenómeno de formación y progresión de la brecha, es el de progresión lineal, en el que se contemplan diversos parámetros geométricos y temporales. A continuación se calculan los parámetros más importantes:

- Dimensiones de la brecha:

Forma de rotura: Trapecial

Profundidad de la brecha: hasta el contacto con el cauce en el pie

Ancho medio de la brecha:

$$b = 20 * (V * h)^{0,25}$$

Donde:

b, es el ancho de la brecha en m.

V, volumen del embalse en Hm³.

h, profundidad de la brecha en m.

En nuestro caso:

$$b = 17,48 \text{ metros}$$

- Tiempo de desarrollo de la brecha:

$$T = 4,8 * V^{0,5} / h$$

Donde:

T, es el tiempo de rotura en horas

V, es el volumen del embalse en Hm³

h, es la altura de la balsa en m.

En nuestro caso es:

$$T = 0,088 \text{ horas}$$

Este tiempo y tamaño de la brecha que se ha calculado es obtenido a partir de la formulación del *Reglamento Técnico sobre Seguridad de Presas y Embalses* y será introducido en HEC-RAS como dato de entrada en la simulación.

5.3.3.- Características del cauce aguas abajo

A partir del análisis de la zona se han estudiado las posibles obras que pueden producir obstrucciones significativas en el cauce o dar lugar a fenómenos hidráulicos de naturaleza local que pueden incidir de manera importante en la propagación de la onda.

En el caso que nos ocupa, el caudal producido por la rotura del embalse sería recogido a escasos metros por el Arroyo Salado.

En las proximidades del embalse no existen edificaciones ni elementos que pudiesen ser afectados por la rotura de este.

El único elemento aguas abajo que nos condiciona la clasificación del embalse es estructura de paso de la carretera autonómica A-6000 (Figura 38), que une los municipios de Torrequebradilla y Villargordo. Este elemento, si fuese sobrepasado por la onda de rotura y atendiendo a la Guía técnica de clasificación de embalses en función del riesgo potencial, sería un daño importante (Figura 39) y por lo tanto elevaría la clasificación del embalse a la categoría B

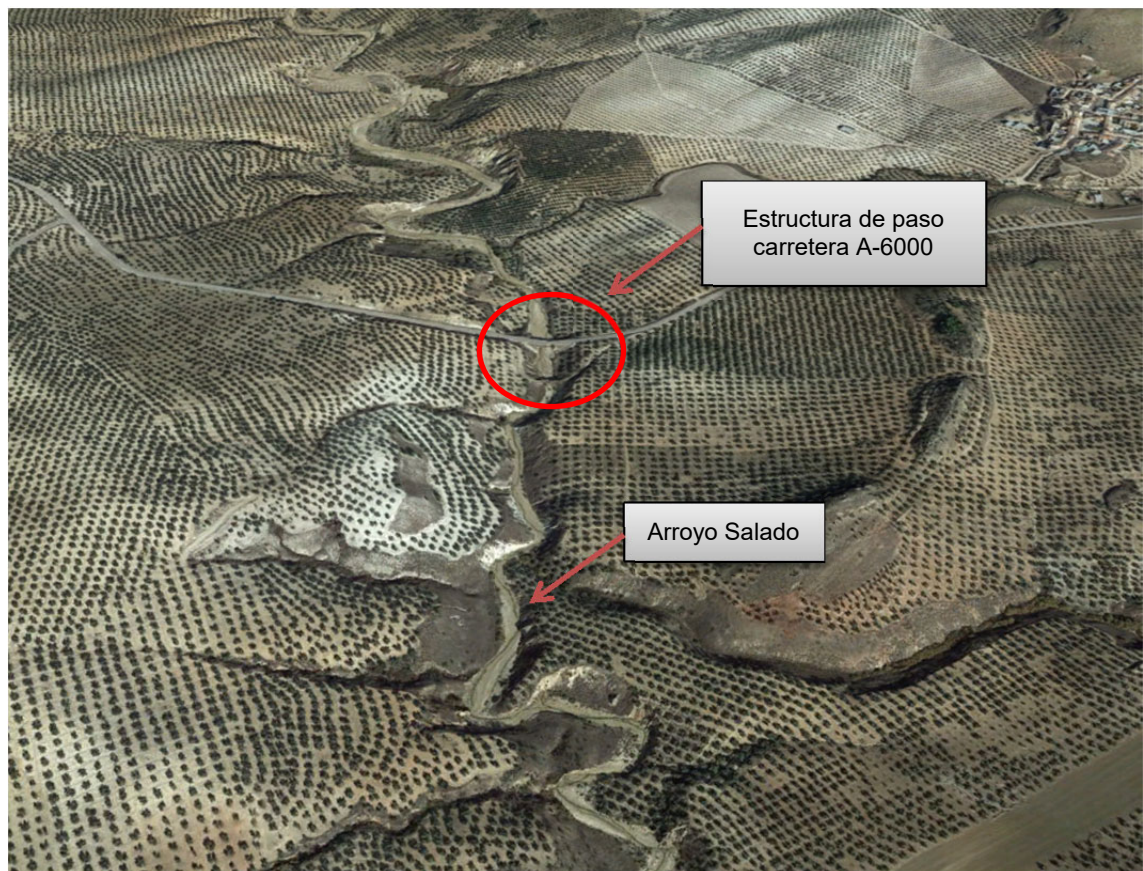


Figura 38. Arroyo salado

ELEMENTO	DAÑOS POTENCIALES		
	MODERADOS	IMPORTANTES	MUY IMPORTANTES
Industrias y polígonos industriales y propiedades rústicas ¹	n° de instalaciones < 10	10 < n° de instalaciones < 50	n° de instalaciones > 50
Cultivos de secano	Superficie < 3.000 Has	3.000Has < superficie < 10.000Has	Superficie > 10.000 Has
Cultivos de regadío	Superficie < 1.000 Has	1.000Has < superficie < 5.000Has	Superficie > 5.000 Has
Carretera		Red general de las CC.AA. u otras redes de importancia equivalente	Red general del estado y red básica de las CC.AA.
Ferrocarriles		ff.cc. vía estrecha	ff.cc. vía ancha y alta velocidad

Figura 39. Tabla de la Guía técnica de clasificación de embalses en función del riesgo potencial

El estudio se realiza hasta la carretera A-6000. Aguas abajo no existen elementos que puedan elevar la categoría del embalse y el arroyo confluye en el río Guadalquivir, que absorbe la avenida producida por el embalse.

Rugosidad:

El factor de rugosidad que se aplica los diferentes perfiles transversales se obtiene de forma empírica con base en los datos bibliográficos y con inspección visual de los tramos. En éste caso se va a utilizar el método propuesto por el *Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos (U.S. Soil Conservacion Service)*.

Los pasos a seguir para la determinación del *Coefficiente de Rugosidad de Manning* n es el siguiente:

1.- Se supone un el valor de n básico.

- Cauces de tierra	0.010
- Cauces de grava fina	0.014
- Cauces en roca	0.015
- Cauces en grava gruesa	0.028

2.- Aumento del coeficiente básico por el grado de irregularidad del cauce:

- Cauces parejos	0.000
- Poco irregulares	0.005
- Moderados	0.010
- Muy irregulares	0.020

3.- Aumento del coeficiente por cambio de dimensiones y forma de la sección transversal.

- Graduales	0.000
- Frecuentes	0.010- 0.015
- Ocasionales	0.005

4.- Aumento del coeficiente por obstrucciones.

- Inapreciables	0.000
- Apreciables	0.010- 0.015
- Poco apreciables	0.005

5.- Aumento del coeficiente por el efecto de la vegetación.

- De efecto bajo	0.005- 0.010
- De efecto medio	0.010-0.025
- De efecto alto	0.025- 0.050
- De efecto extremo	0.050- 0.100

Por lo tanto, para obtener el *Coefficiente de Rugosidad n* para el caso que nos ocupa, tomaremos los siguientes parámetros:

- 1.- Valor básico de n por materiales *de grava fina* = 0.014
- 2.- Aumento de n por irregularidades *moderados* = 0.010
- 3.- Aumento de n por cambio de dimensiones y formas de la sección transversal *ocasionales* = 0.005
- 4.- Aumento de n por obstrucciones de *efecto poco apreciable* = 0.005
- 5.- Aumento de n por presencia de vegetación como *efecto medio* = 0.005 (cauce del arroyo) y 0.025 (márgenes de arroyo)

Valor total del *Coefficiente de Rugosidad de Manning*:

Para el cauce del arroyo:

$$n = 0.014 + 0.010 + 0.005 + 0.005 + 0.005 = \mathbf{0.039}$$

Para los márgenes del arroyo:

$$n = 0.014 + 0.010 + 0.005 + 0.005 + 0.025 = \mathbf{0.059}$$

En la Figura siguiente (Figura 41) se muestra una imagen con todos los elementos de la simulación.

El software HEC-RAS enumera las secciones transversales (RS) en modo decreciente, esto quiere decir que el número que aparece en la sección es la distancia en metros que hay desde la sección hasta el final de la simulación aguas abajo.

La descripción de la leyenda (Figura 40) de las distintas secciones transversales es la siguiente:

- **WS PF 1.** Es la lámina de agua
- **Ground.** Es la topografía
- **Bank Sta.** Son los puntos que separan en la sección la zona del cauce con las llanuras de inundación que se encuentran en los dos márgenes (puntos que marcan el cambio de coeficiente de manning).

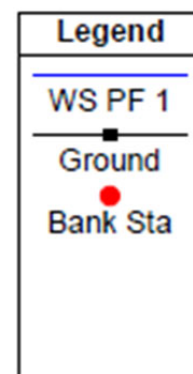


Figura 40. Leyenda Secciones

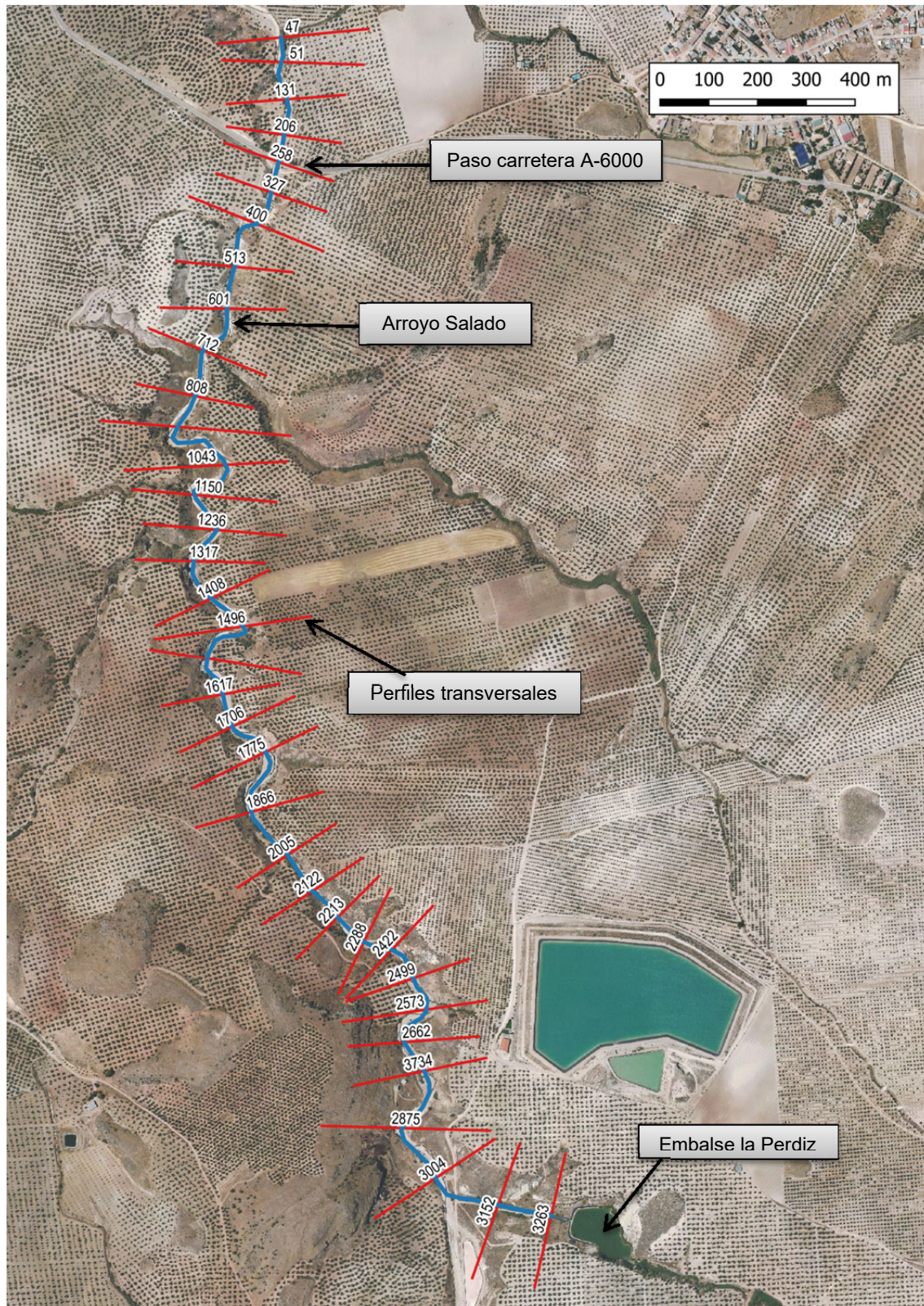


Figura 41. Elementos que componen la simulación

5.3.4.- Resultados y discusión

Una vez realizadas las simulaciones, tomando como base los distintos modelos digitales de terreno observamos lo siguiente:

- En nuestra zona de estudio el único elemento que podría elevar la clasificación en el embalse era el paso de la carretera A-6000. Como se muestra a continuación, en ningunas de las simulaciones se produce el salto de agua por encima de la carretera (Figuras 42, 43 y 44).

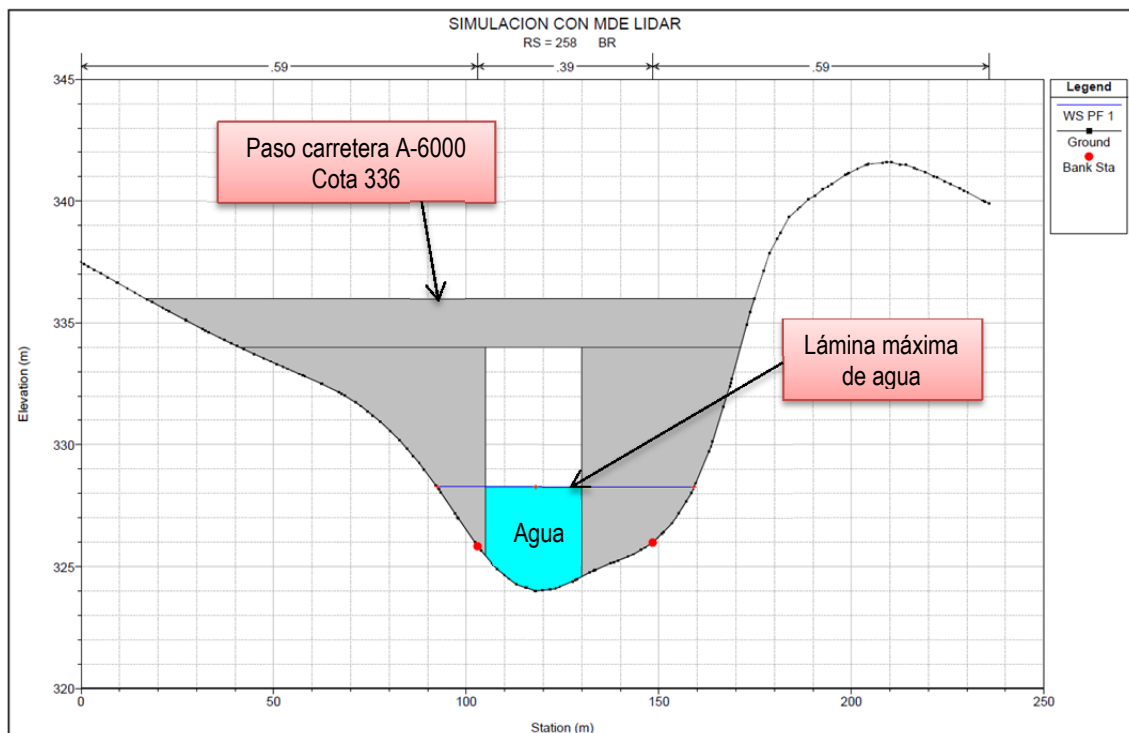


Figura 42. Perfil paso A-6000 con MDT Lidar

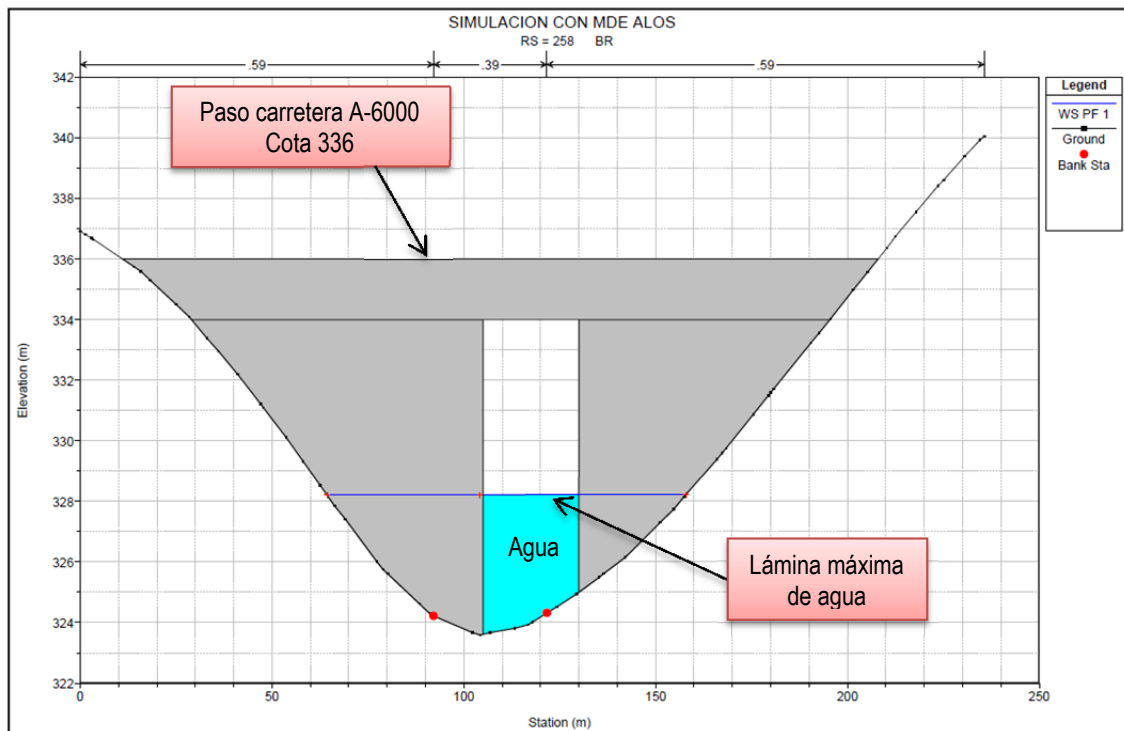


Figura 43. Perfil paso A-6000 con MDT ALOS

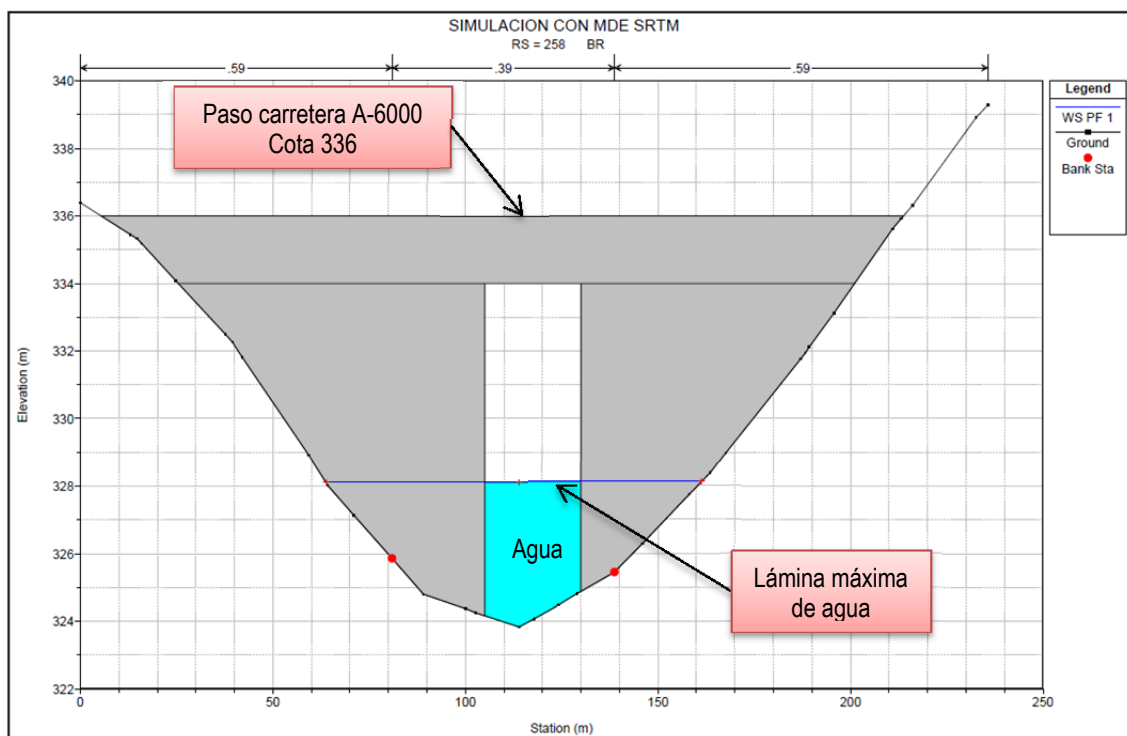


Figura 44. Perfil paso A-6000 con MDT SRTM

Es por esto que este embalse, en las tres modelizaciones obtendríamos la misma clasificación en función del riesgo potencial, en este caso la menor (Clasificación C).

Si revisamos los calados obtenidos en los perfiles transversales de las diferentes simulaciones observamos en la Figura 45 los siguientes resultados:

PERFIL	Altura lámina de agua (calado)			Diferencias con Lidar	
	LIDAR (m)	ALOS (m)	SRTM (m)	ALOS (m)	SRTM (m)
3263	2,97	4,15	3,87	-1,18	-0,90
3152	5,62	7,25	5,70	-1,63	-0,08
3004	2,73	2,84	2,85	-0,11	-0,12
2875	3,40	3,28	3,65	0,12	-0,25
2734	4,05	3,97	3,18	0,08	0,87
2662	4,78	3,69	3,49	1,09	1,29
2573	3,95	3,61	3,41	0,34	0,54
2499	4,56	3,25	3,27	1,31	1,29
2422	3,97	3,42	3,06	0,55	0,91
2362	4,56	3,23	3,06	1,33	1,50
2288	4,64	3,94	3,30	0,70	1,34
2213	5,01	3,82	3,34	1,19	1,67
2122	3,81	3,64	3,35	0,17	0,46
2005	3,80	3,53	3,15	0,27	0,65
1866	3,71	2,84	2,81	0,87	0,90
1775	4,53	3,34	3,28	1,19	1,25
1706	3,35	3,35	3,19	0,00	0,16
1617	4,16	3,64	3,07	0,52	1,09
1496	4,26	2,97	2,64	1,29	1,62
1408	4,70	3,42	3,02	1,28	1,68
1317	4,37	2,87	2,95	1,50	1,42
1236	3,03	3,07	2,98	-0,04	0,05
1150	4,05	3,08	2,92	0,97	1,13
1043	3,75	3,20	3,15	0,55	0,60

Figura 45. Resultados (continuación)

PERFIL	Altura lámina de agua (calado)			Diferencias con Lidar	
	LIDAR	ALOS	SRTM	ALOS (m)	SRTM (m)
	(m)	(m)	(m)		
880	4,45	2,98	3,20	1,47	1,25
808	4,89	3,32	3,40	1,57	1,49
712	4,59	3,32	3,50	1,27	1,09
601	5,76	3,43	3,08	2,33	2,68
513	5,94	3,64	3,18	2,30	2,76
400	4,68	3,87	3,40	0,81	1,28
327	5,01	3,20	3,09	1,81	1,92
258	4,32	3,19	2,66	1,13	1,66
206	3,41	3,33	3,00	0,08	0,41
131	2,86	3,42	2,78	-0,56	0,08
51	3,89	2,92	2,51	0,97	1,38
47	2,01	2,39	2,03	-0,38	-0,02

Figura 45. Resultados

En las dos últimas columnas de la tabla anterior se muestra la diferencia entre el modelo que hemos tomado como referencia (Lidar) y los otros dos. Como podemos observar hay muchos perfiles en los que la diferencia de calado es de pocos centímetros, pero hay otros en los que la diferencia es de más de un metro, incluso en un par de ellos (perfiles 601 y 513) la diferencia en el calado sobrepasa los dos metros.

En este caso es irrelevante porque en estos perfiles no existe ningún elemento que pudiese ser afectado pero en otra simulación en la que hubiese una vivienda o una carretera, variaría la clasificación del embalse dependiendo qué modelo digital del terreno usásemos como base.

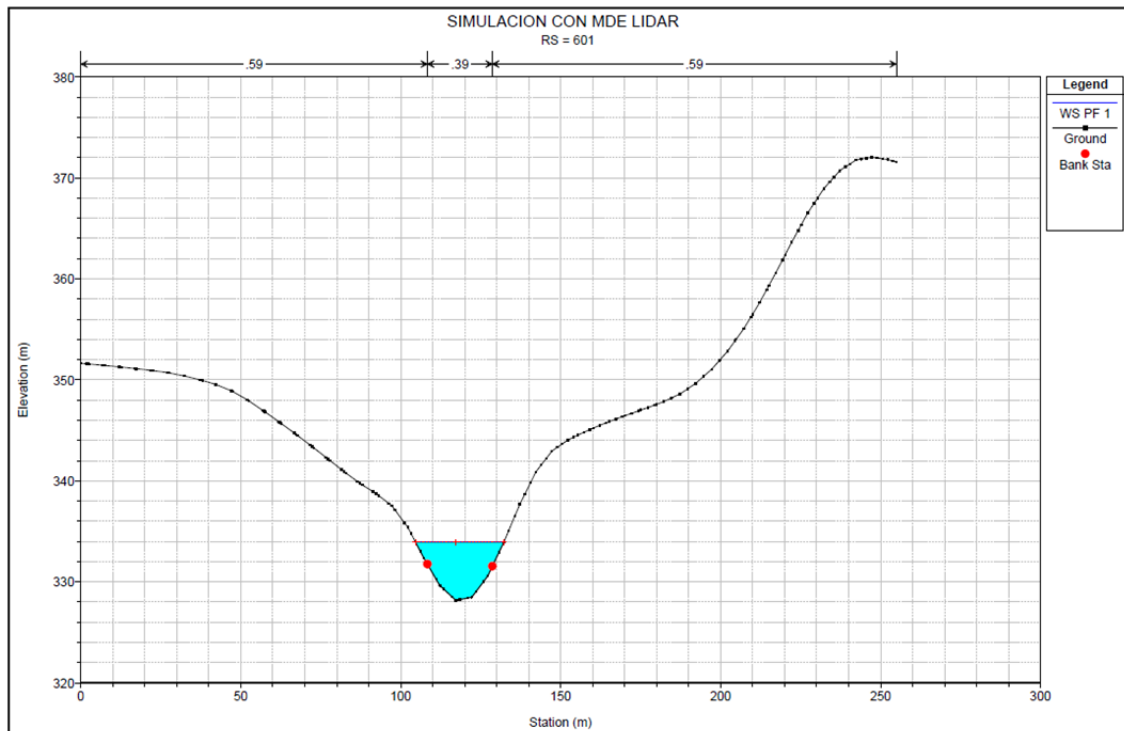


Figura 46. Perfil 601 con MDT Lidar

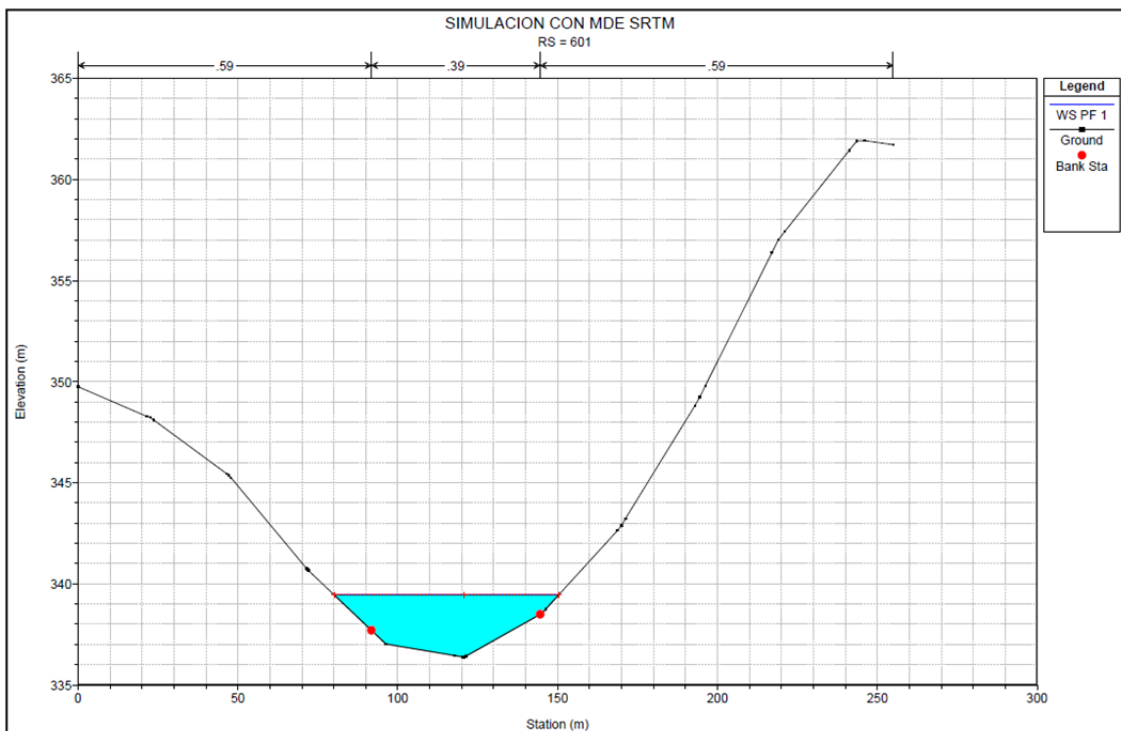


Figura 47. Perfil 601 con MDT SRTM

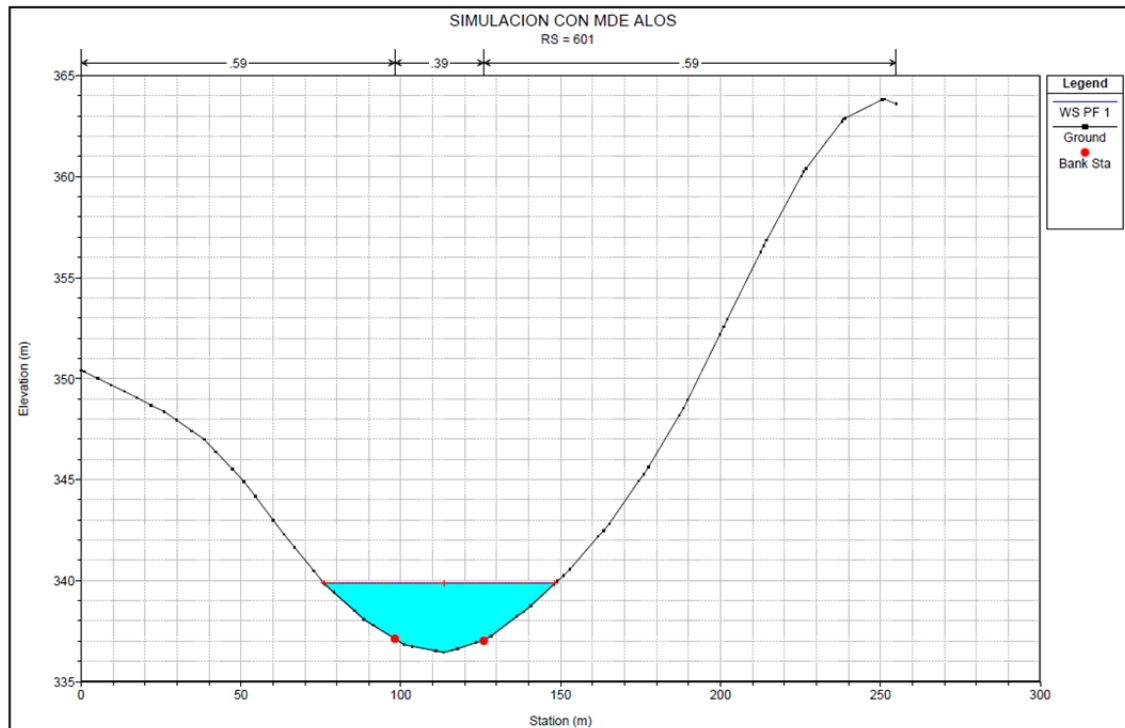


Figura 48. Perfil 601 con MDT ALOS

Las llanuras de inundación que se producen utilizando uno u otro modelo son las siguientes:

- Lidar: 14,55 Has
- ALOS: 18,29 Has
- SRTM: 19,20 Has

Se observa que la simulación que ha usado el MDT Lidar, que tiene más resolución (5x5), produce menos llanura de inundación que la generada por ALOS (12,5x12,5) o SRTM (30x30).

Esto puede deberse al que al tener más resolución, la modelización del cauce esta mejor definida y la mayor parte de la inundación discurriría por este. Conforme los modelos tienen menos resolución, la definición del cauce es menos precisa y la inundación discurre más por los márgenes (Figuras 46, 47, 48).

En las páginas siguientes se muestran las zonas de inundación producidas por los distintos modelos (Figura 49, 50 y 51).

Además en la Figura 52 se muestra una parte del estudio con las tres zonas de inundación superpuestas. En esta Figura la menor superficie inundada la produce el MDT Lidar y la mayor el MDT SRTM.



Figura 49. Zona de inundación generada a partir del MDT Lidar



Figura 50. Zona de inundación generada a partir del MDT ALOS



Figura 51. Zona de inundación generada a partir del MDT SRTM

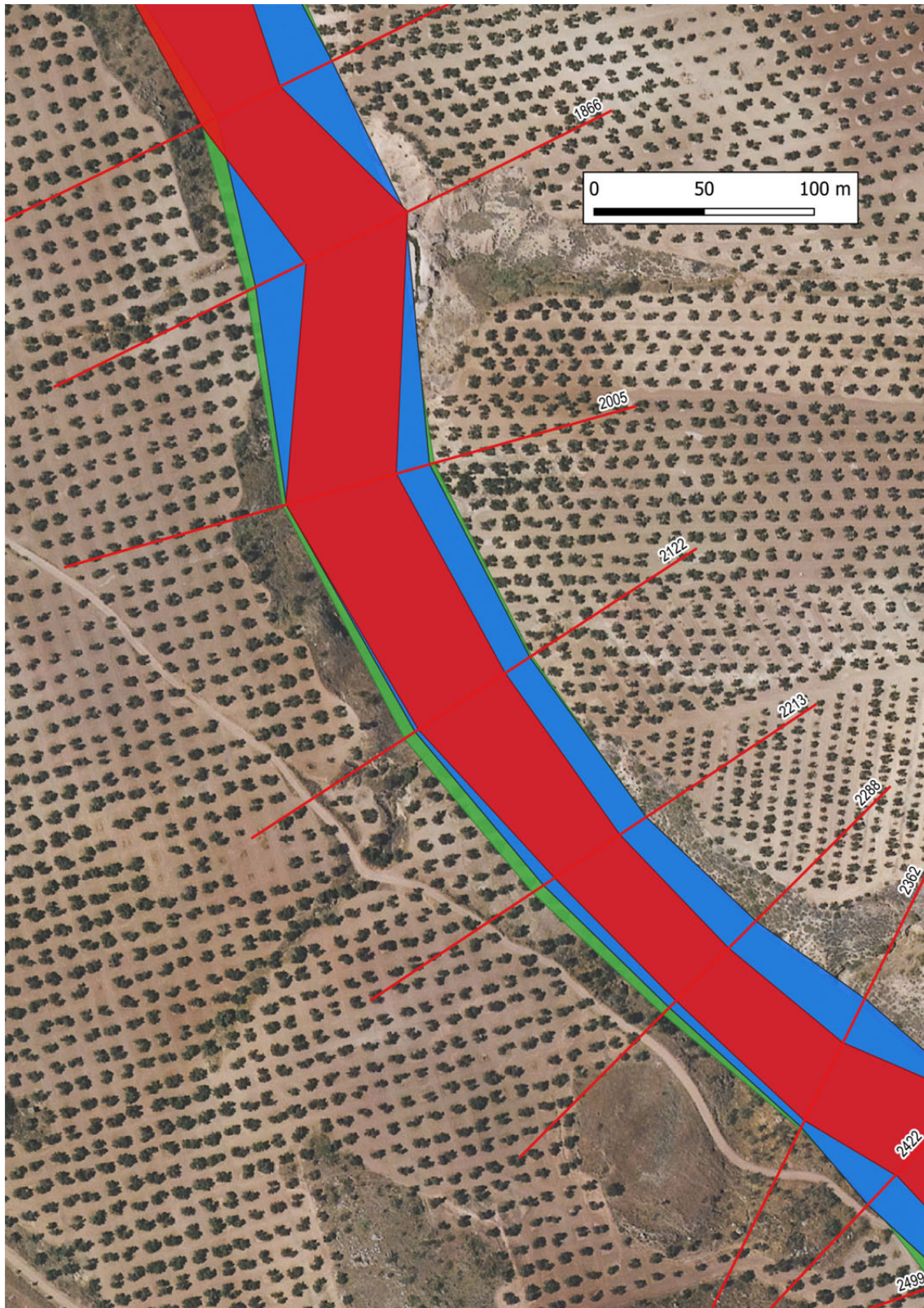


Figura 52. Zona de inundación generada a partir del MDT Lidar, ALOS y SRTM

6.- Conclusiones

Hemos comprobado en este TFM que la generación de modelos digitales del terreno, con pares de imágenes ERS o Sentinel-1, no da buenos resultados. Esto lo achacamos a que el Radar de estos sensores trabaja en una longitud de onda corta que no le permite llegar a la superficie cuando hay vegetación. En el caso de Sentinel-1 además tenemos el problema de que las imágenes tienen una línea base perpendicular pequeña, debido a que este no es el objetivo de estos satélites, sino el de detectar movimientos en la superficie terrestre.

Con respecto a los MDT obtenidos con ALOS y SRTM, se obtiene una buena coherencia con respecto al MDT que hemos tomado como referencia (Lidar) pero en la simulación, aunque en este caso obtendríamos la misma clasificación en función del riesgo potencial, en algunos perfiles se obtienen calados muy diferentes (llegando a los dos metros), lo cual es mucho porque esa diferencia de calado puede hacer que una vivienda este afectada o no con el consiguiente riesgo que eso supone.

En la zona de inundación producida por los diferentes MDT, observamos que la producida con el MDT Lidar está más encajada y es más estrecha que en los otros dos (ALOS y SRTM). Esto puede ser debido a que al tener más resolución el MDT Lidar (5x5), tiene mejor definido el cauce del río, con lo que la inundación discurre más encajada en el río. Por el contrario los MDT ALOS y SRTM, tienen una resolución menor (12,5x12,5 y 30x30 respectivamente), por lo que el cauce está menos detallado, discurrendo la inundación más por los márgenes.

Hay que tener en cuenta que la zona de estudio hay mucha vegetación (olivar), en zonas de menos vegetación los resultados producirían mejores resultados.

Por lo expuesto anteriormente, los modelos digitales del terreno creados en este TFM, aunque pueden ser muy útiles para otras aplicaciones, para el uso en la clasificación de embalses en función del riesgo potencial, no los consideramos válidos ya que una diferencia de calado de un metro puede suponer la afección o no de una edificación o un servicio esencial.

7.- Referencias

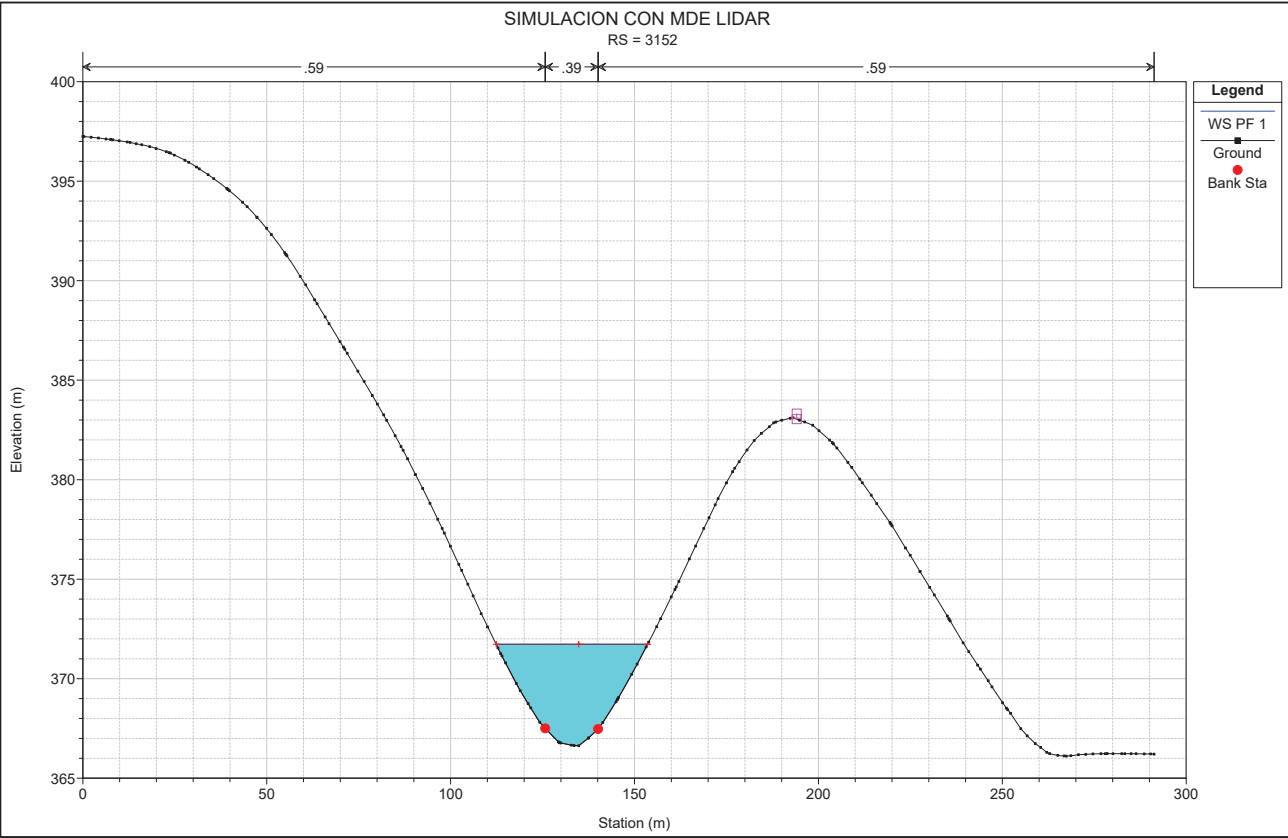
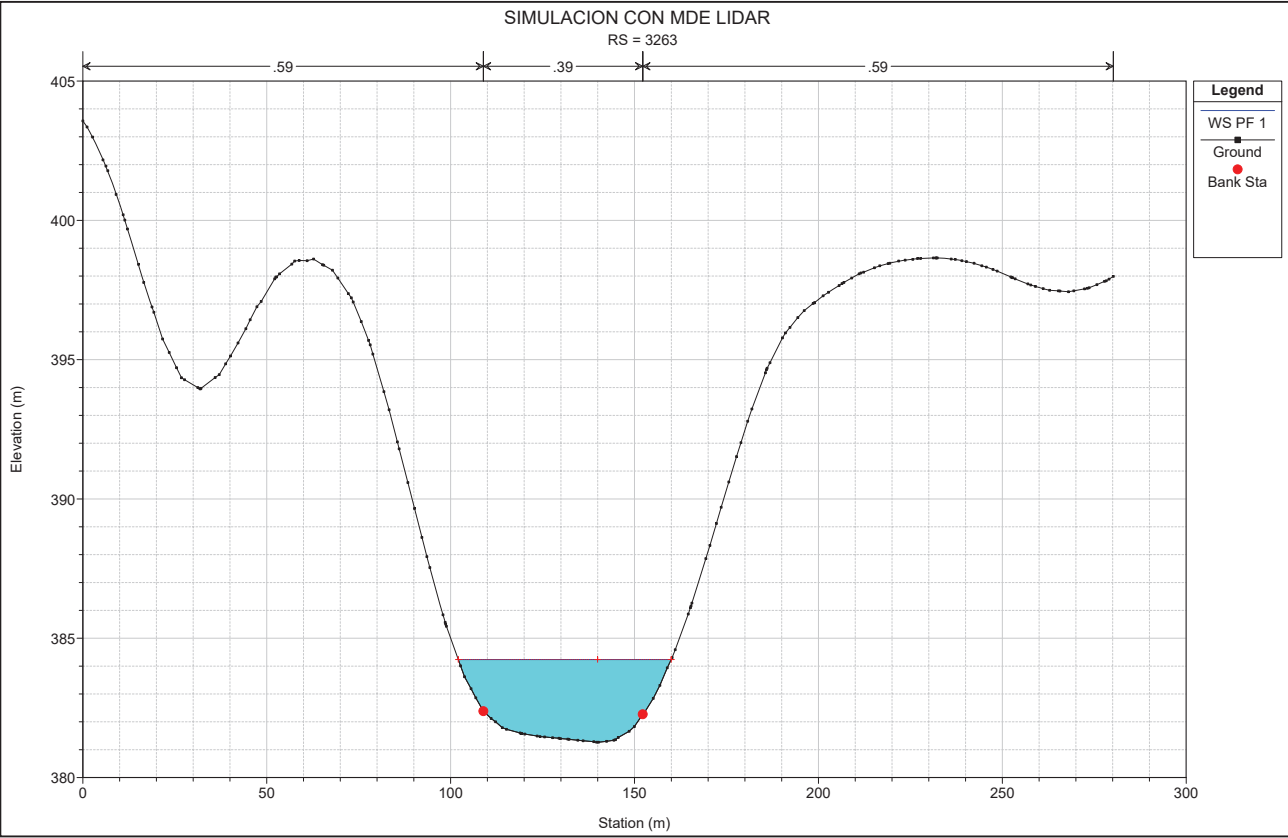
- Web ESA https://www.esa.int/Space_in_Member_States/Spain
- Web USACE (Hec-Ras) <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/>
- Tutoriales SNAP (ESA) <https://step.esa.int/main/doc/tutorials/snap-tutorials/>
- Web ASF Data Search Vertex <https://search.asf.alaska.edu/>
- Web IGN (Instituto Geográfico Nacional) <http://www.ign.es/web/ign/portal>

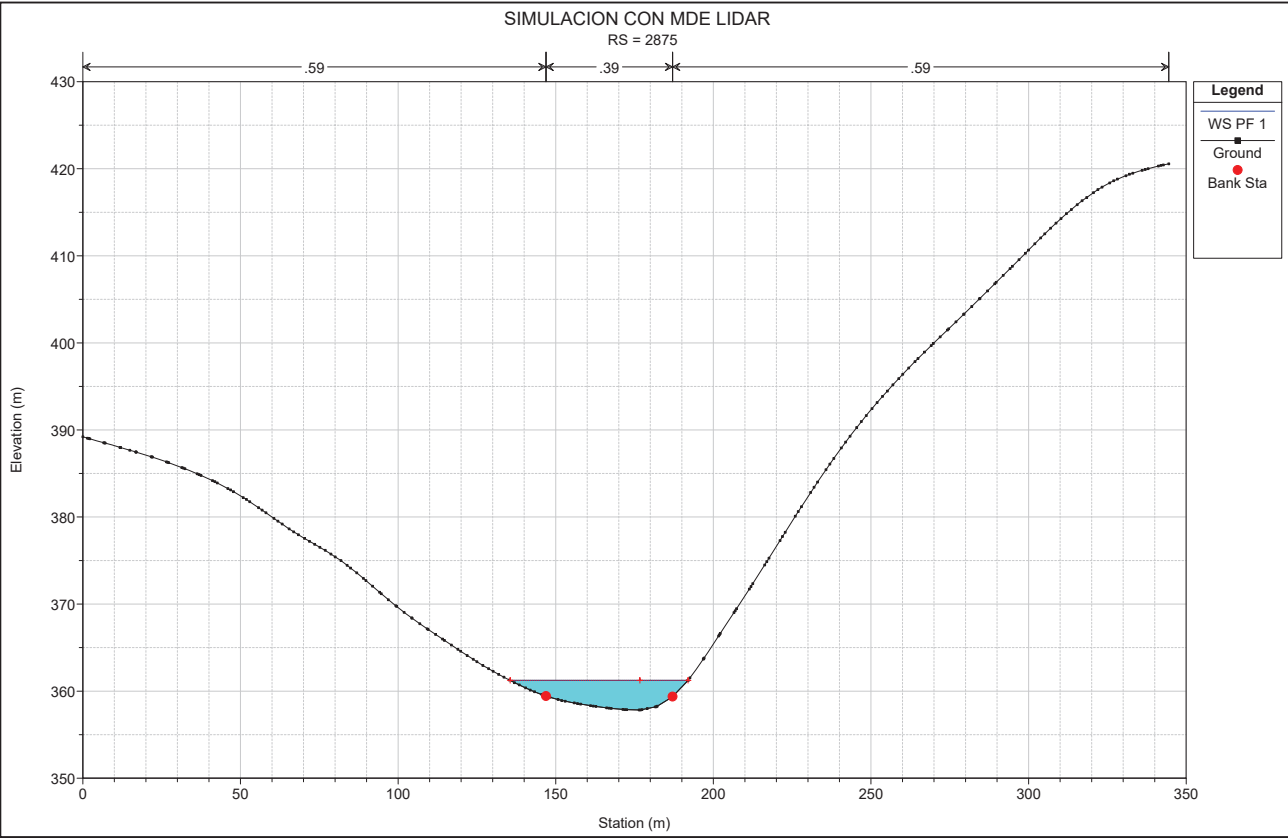
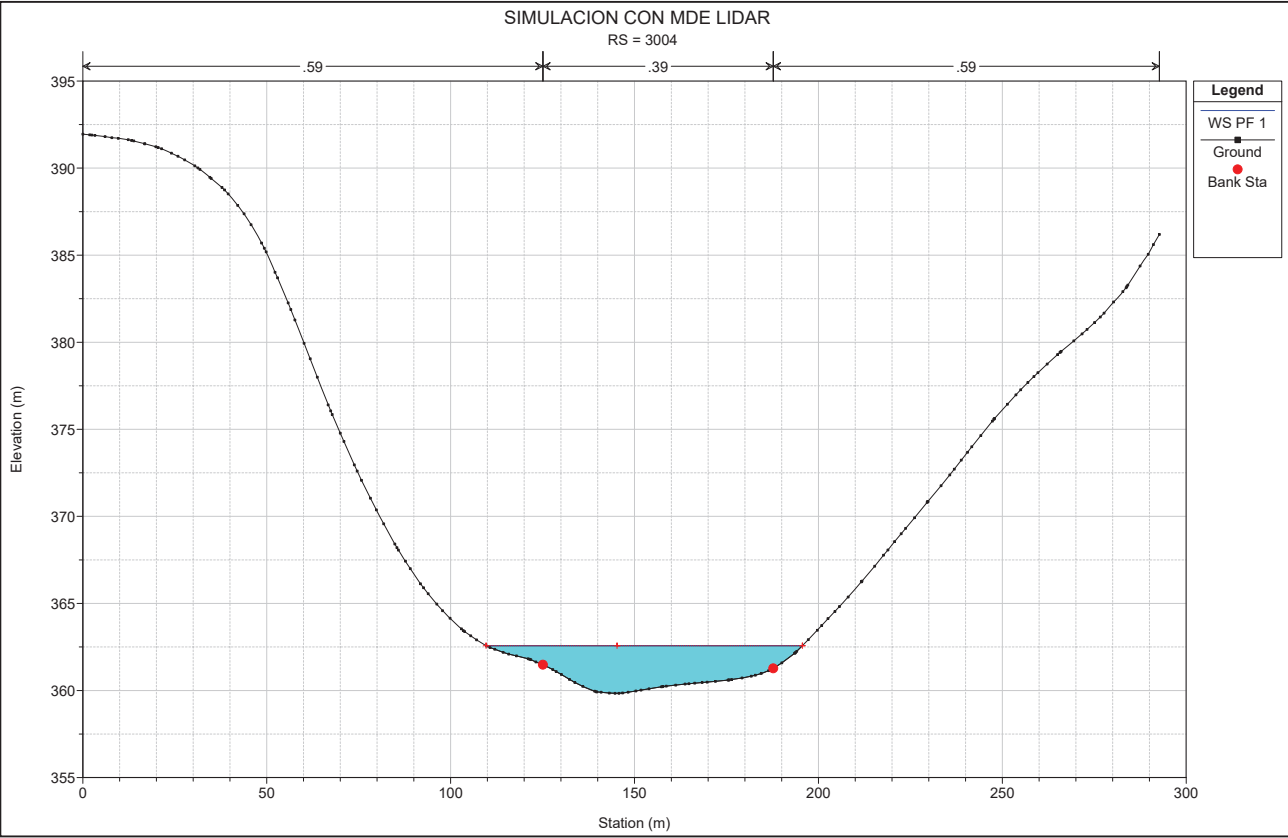
Anexo

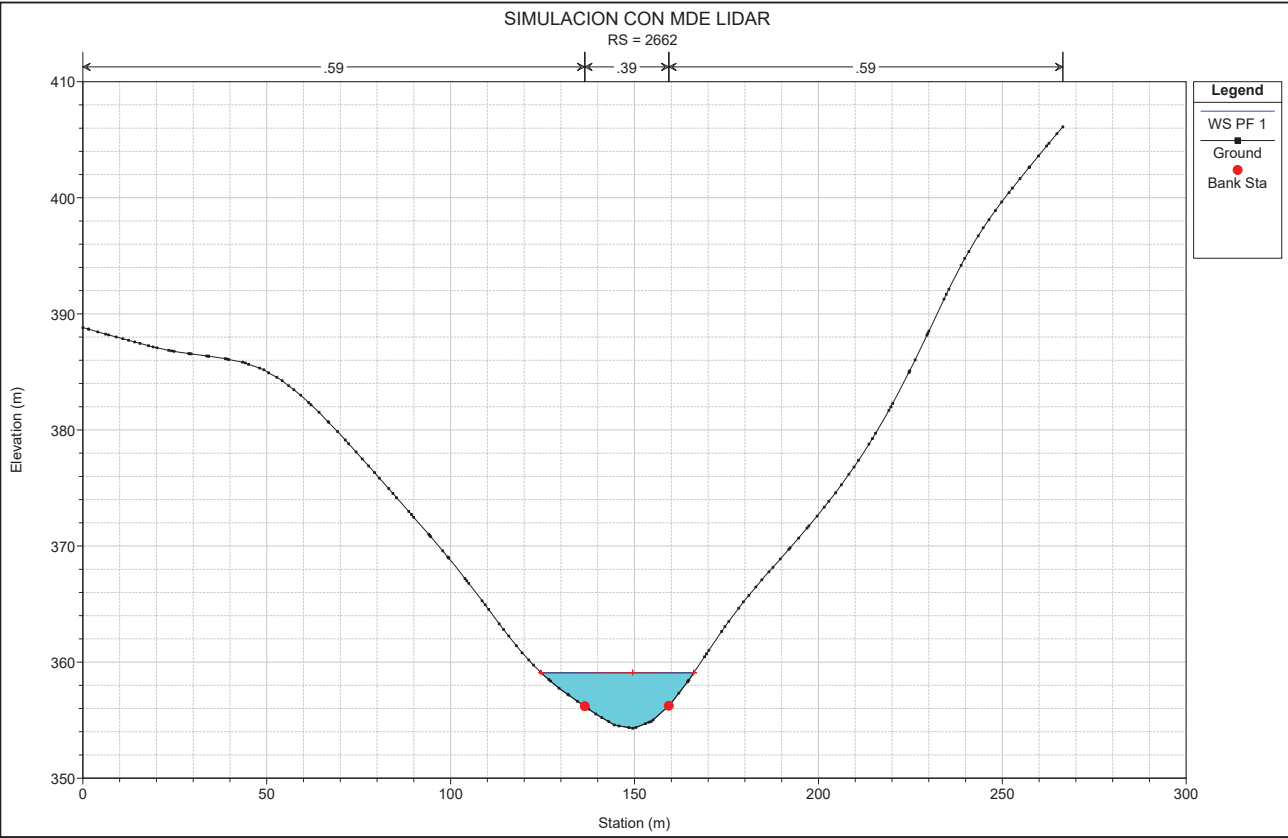
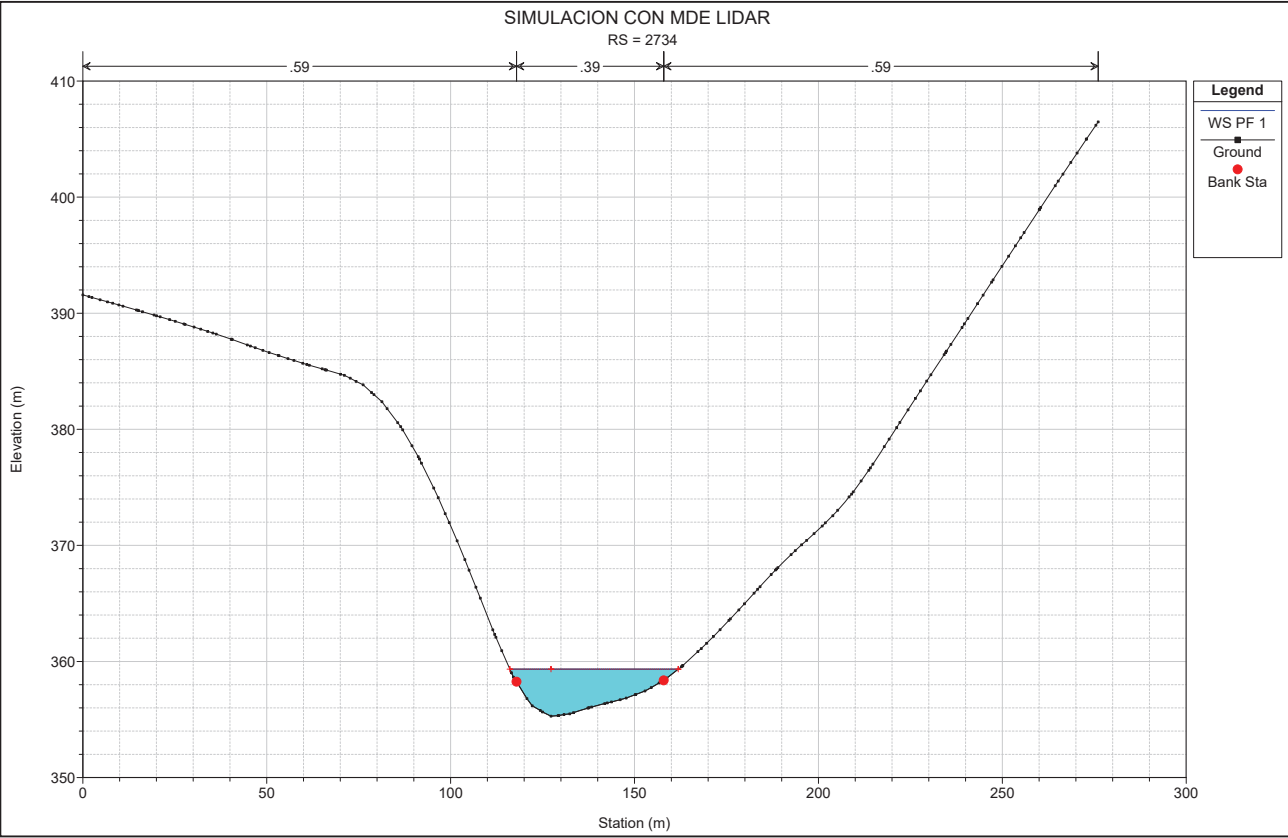
Perfiles transversales obtenidos con las simulaciones de inundabilidad para los MDT Lidar, ALOS y SRTM

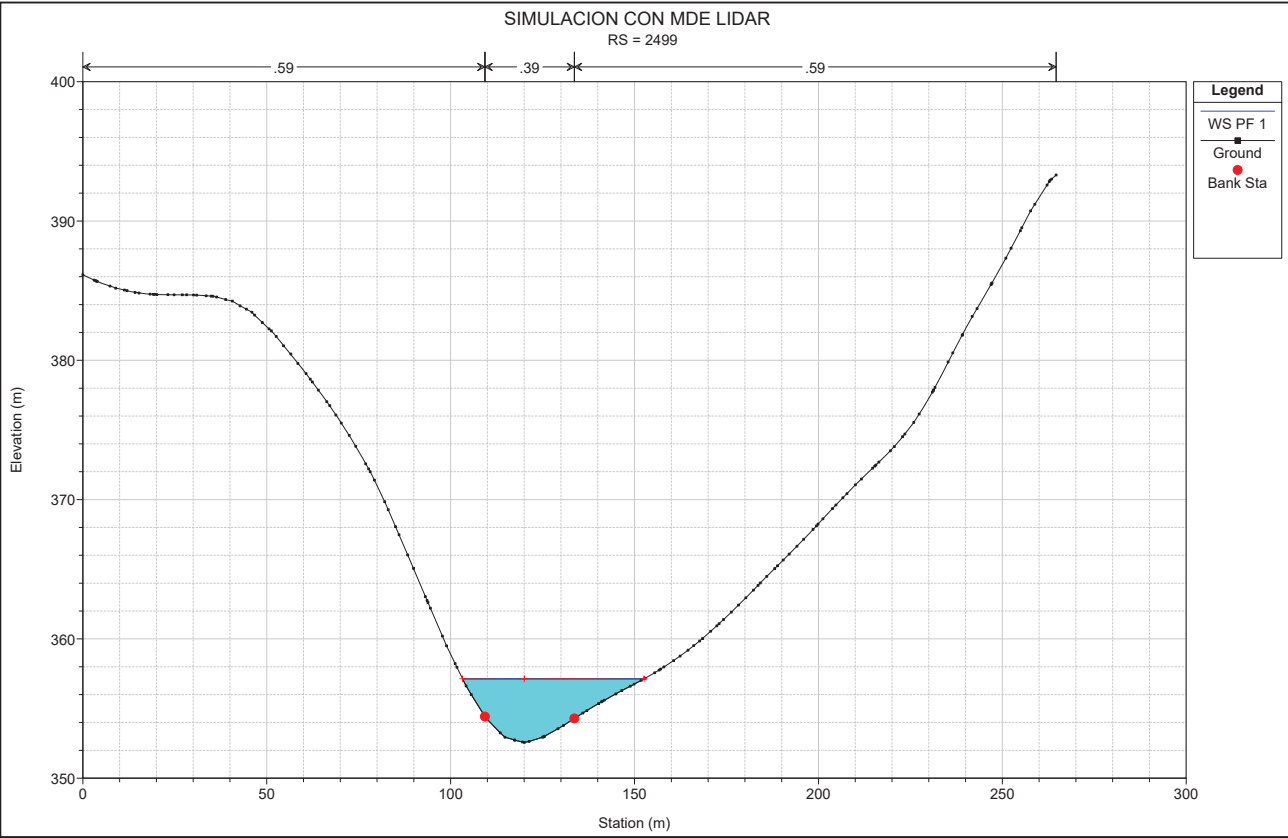
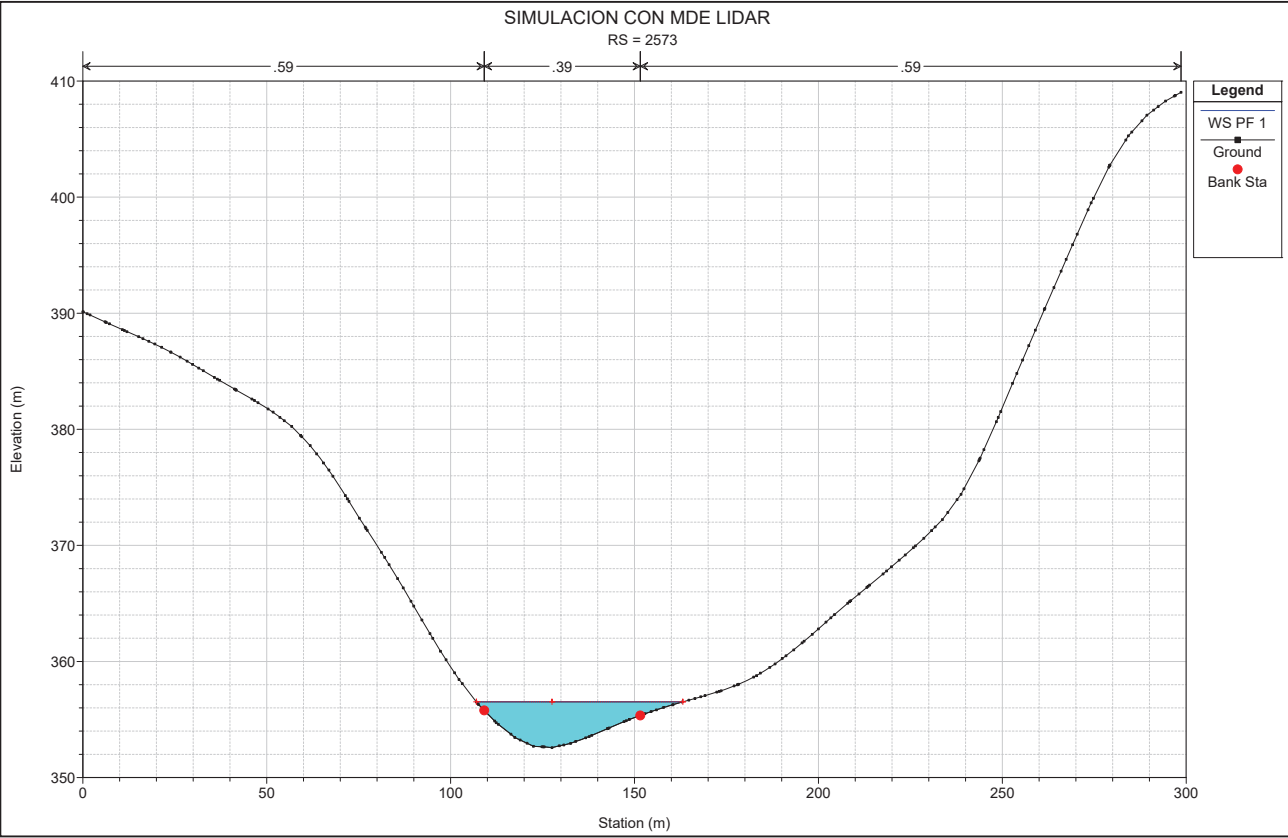
Perfiles transversales

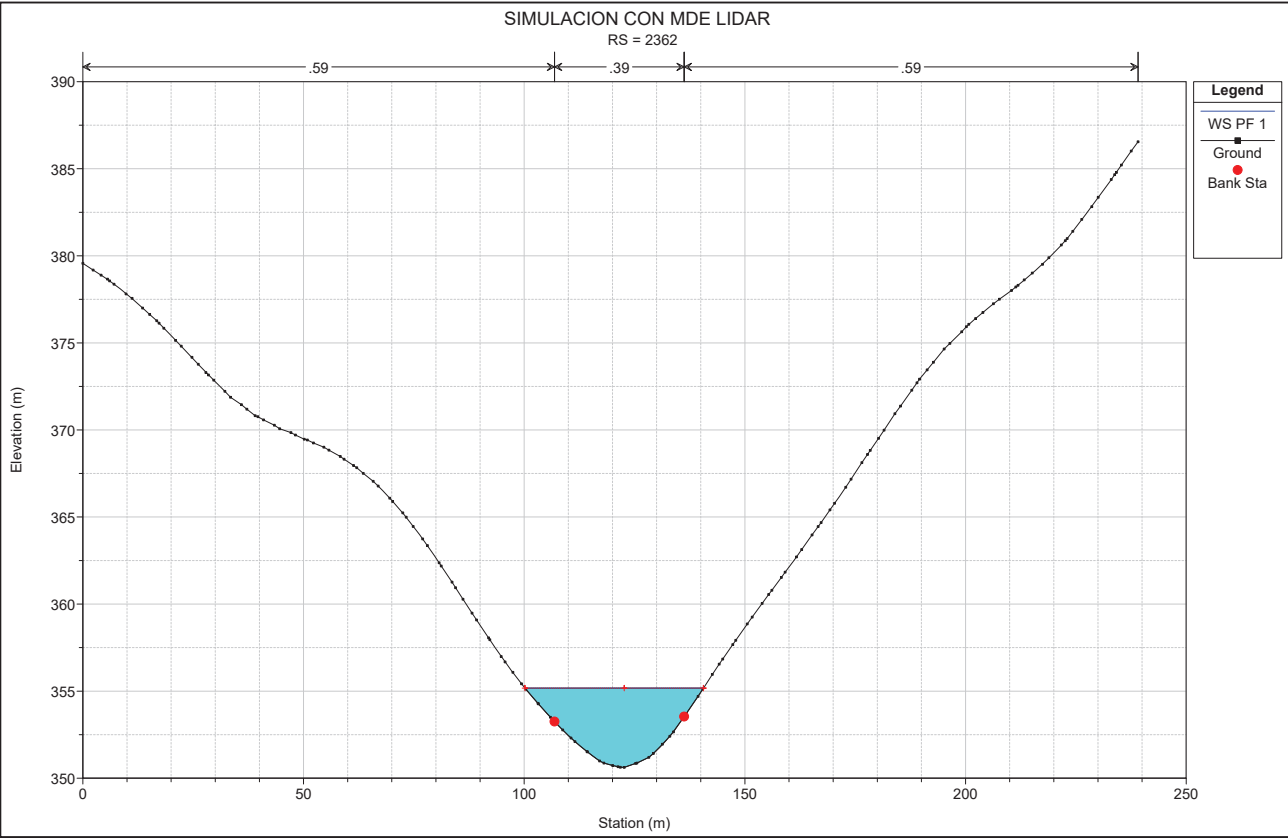
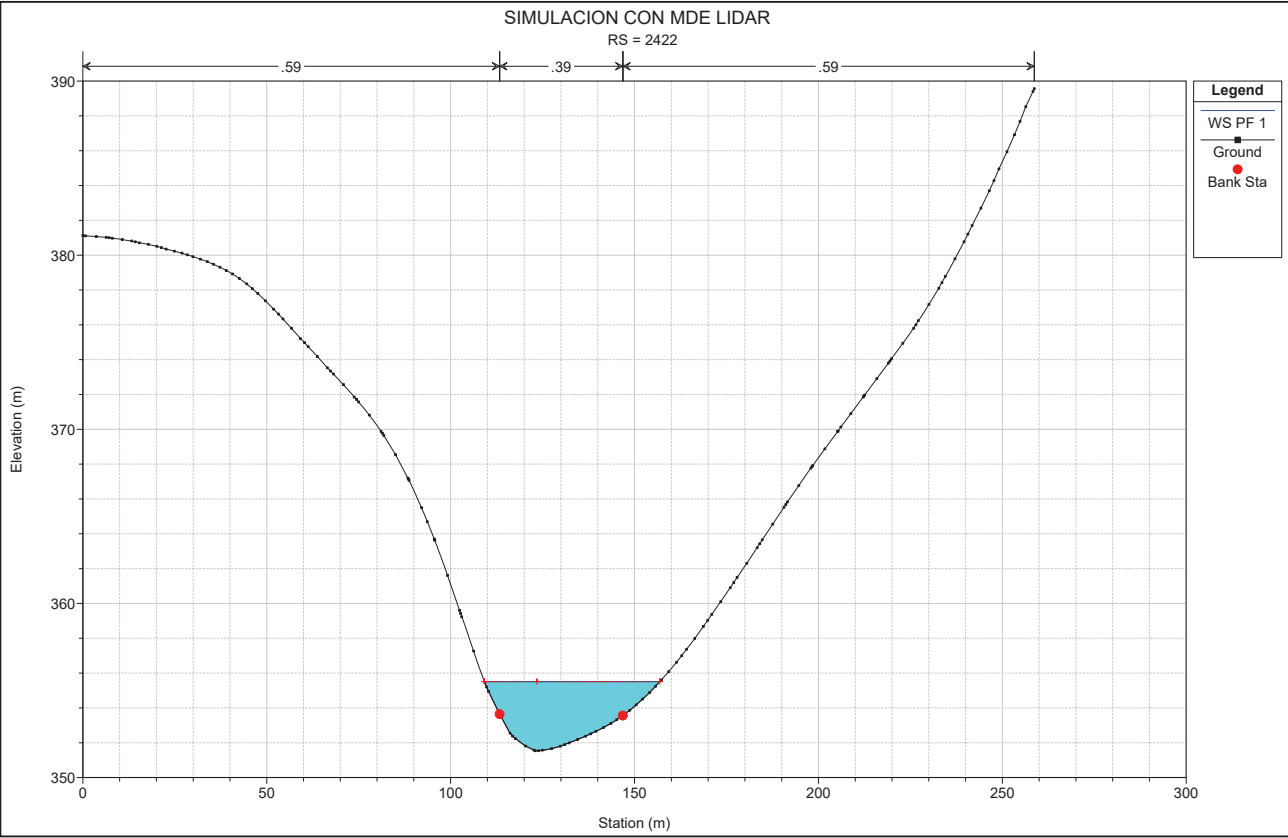
LIDAR

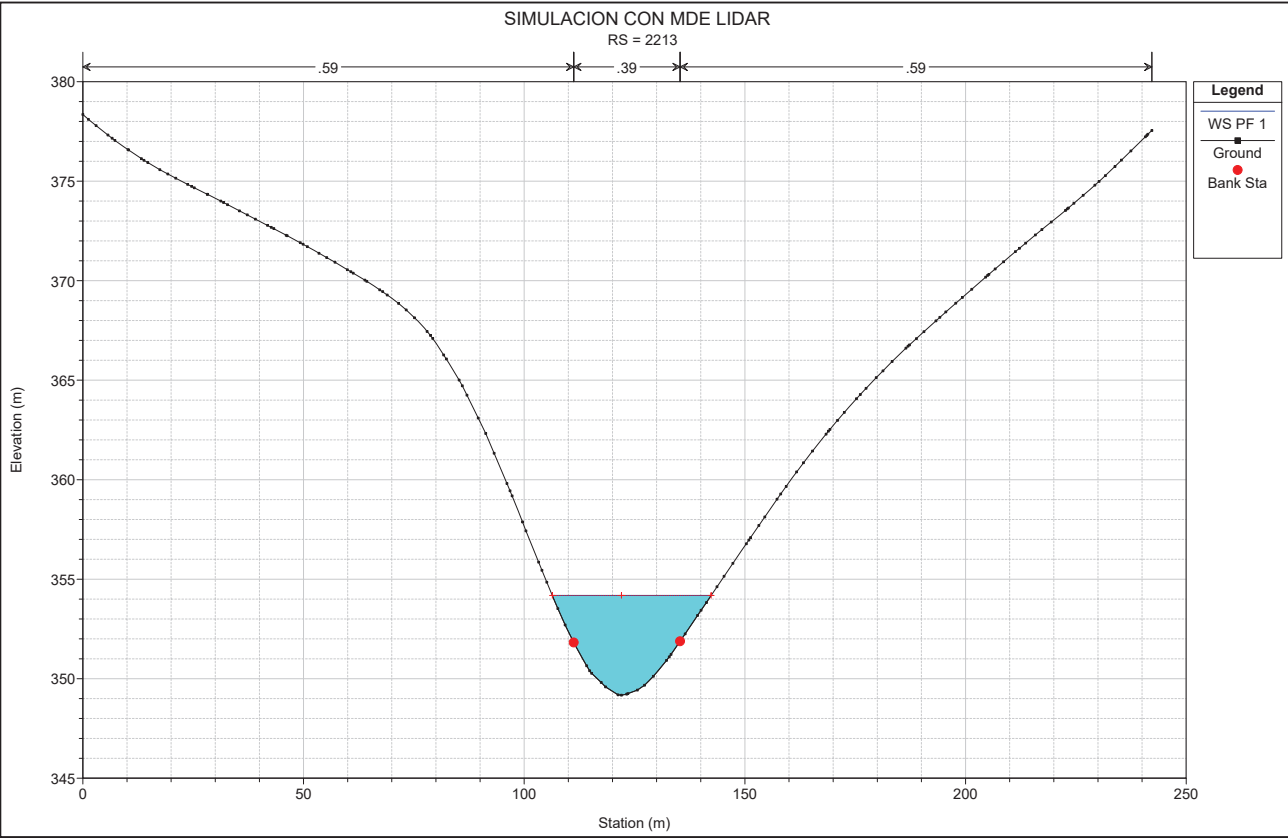
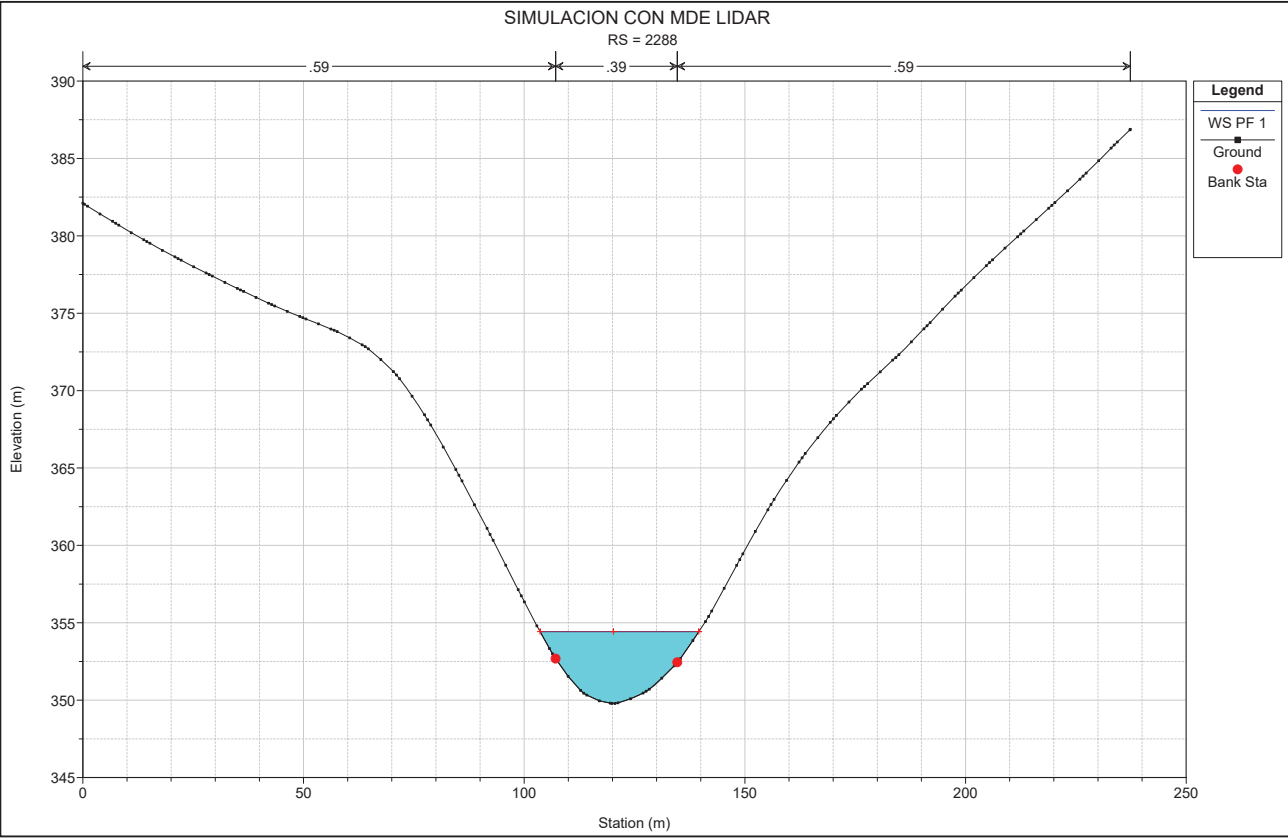


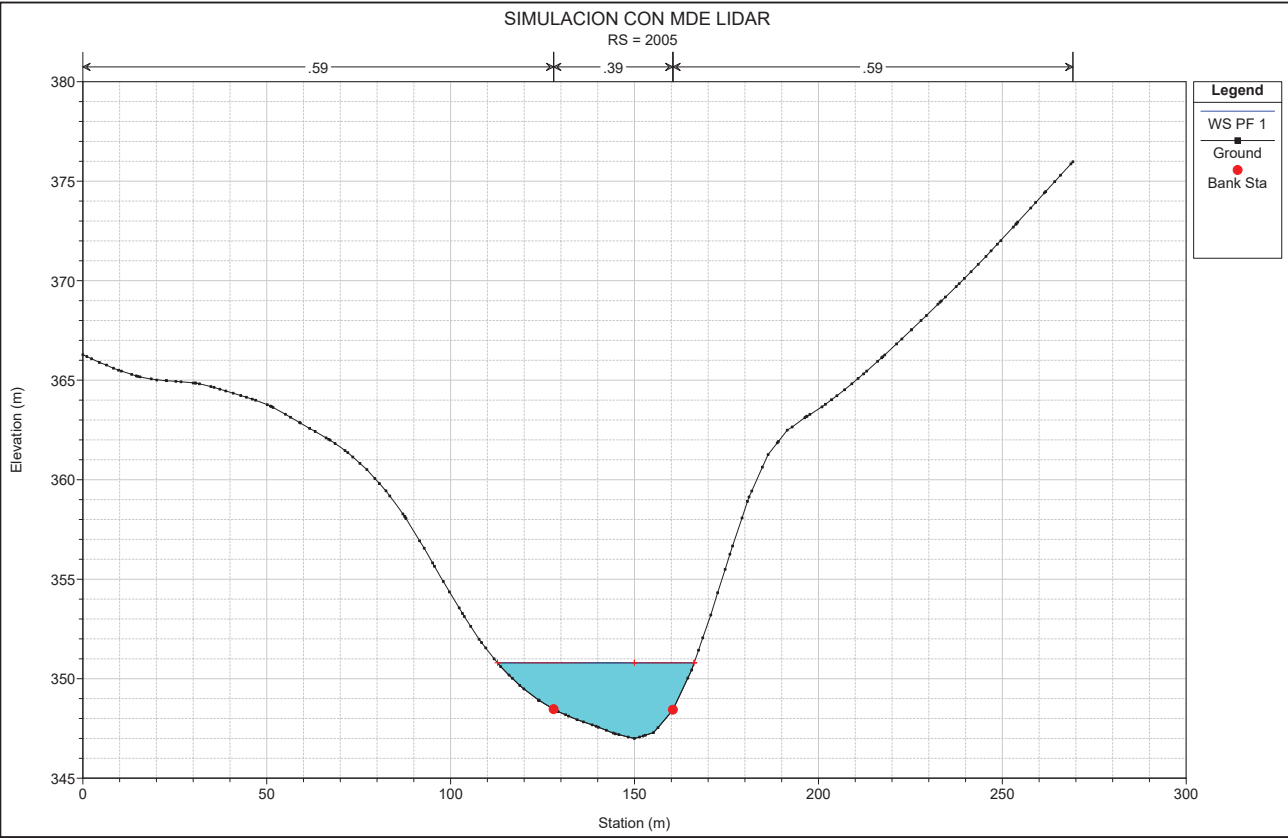
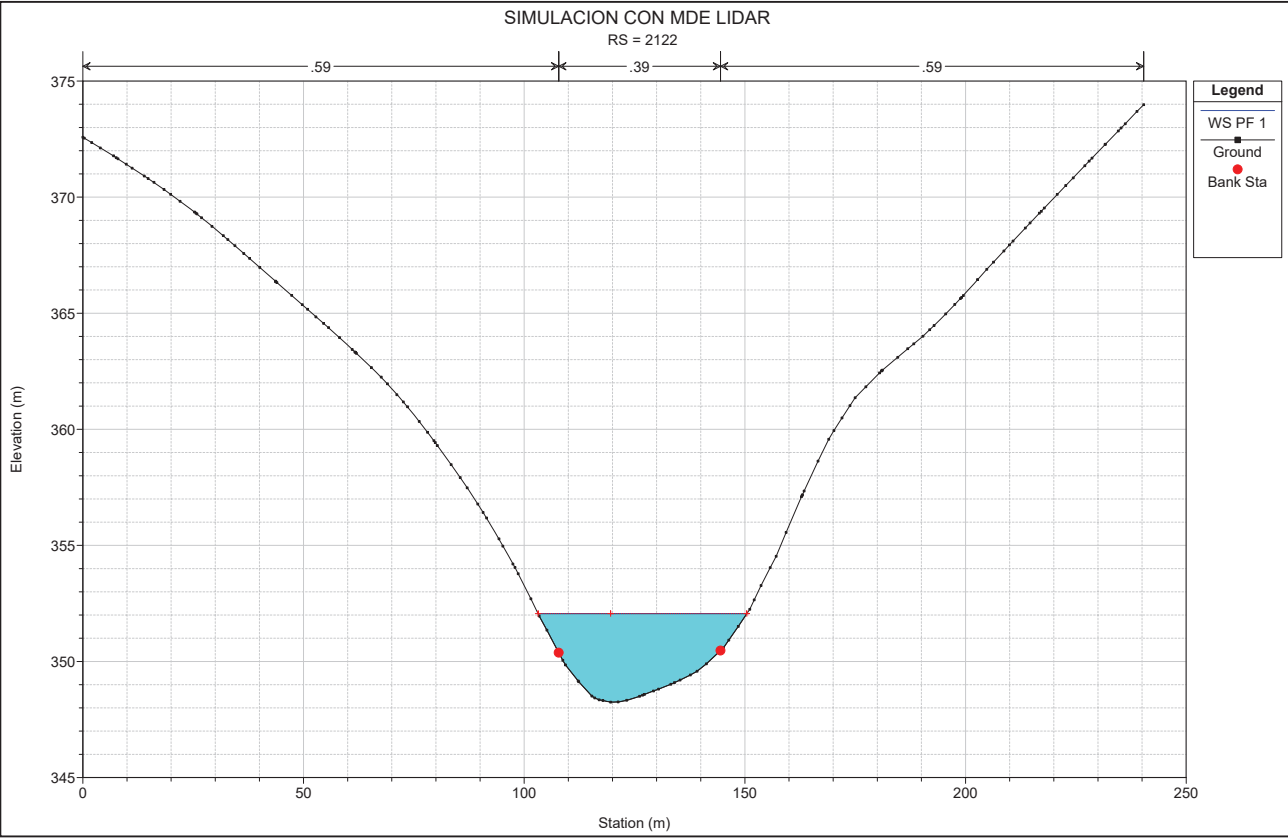


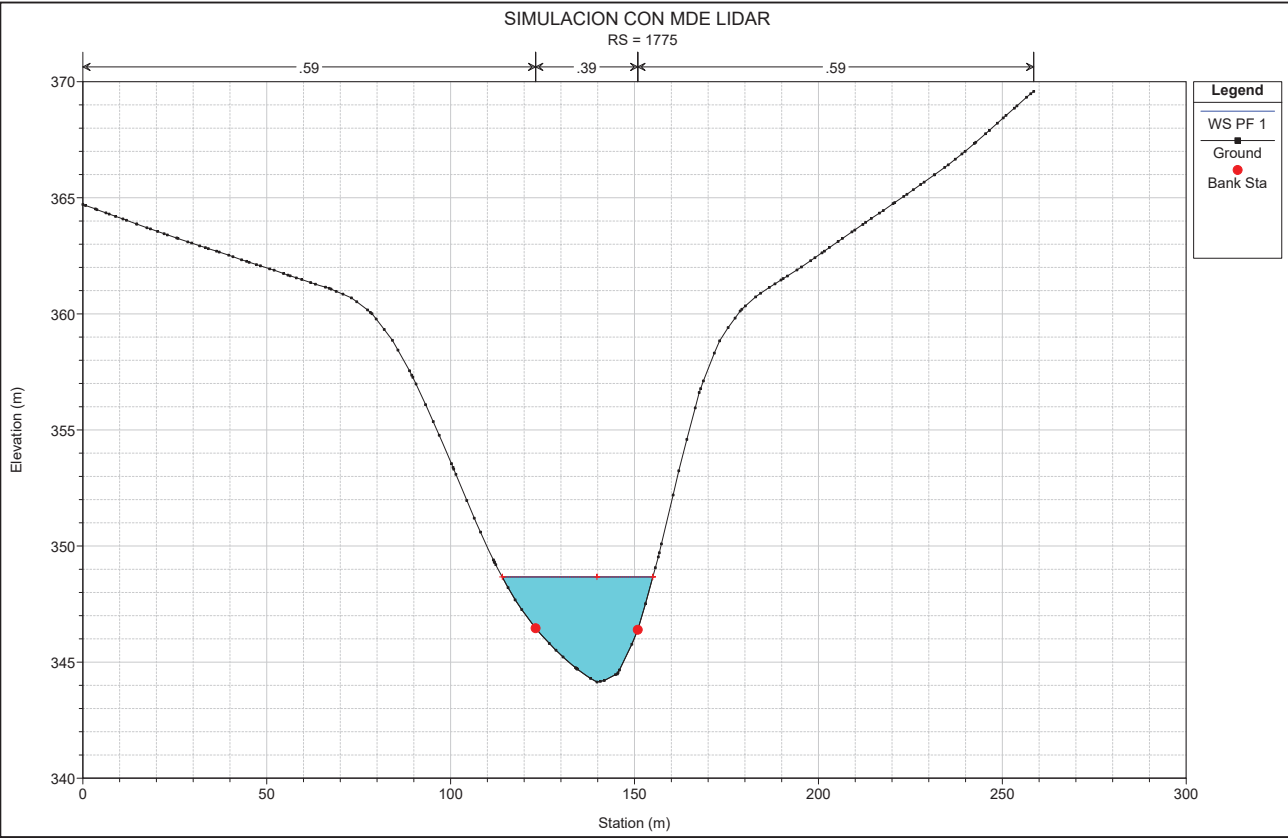
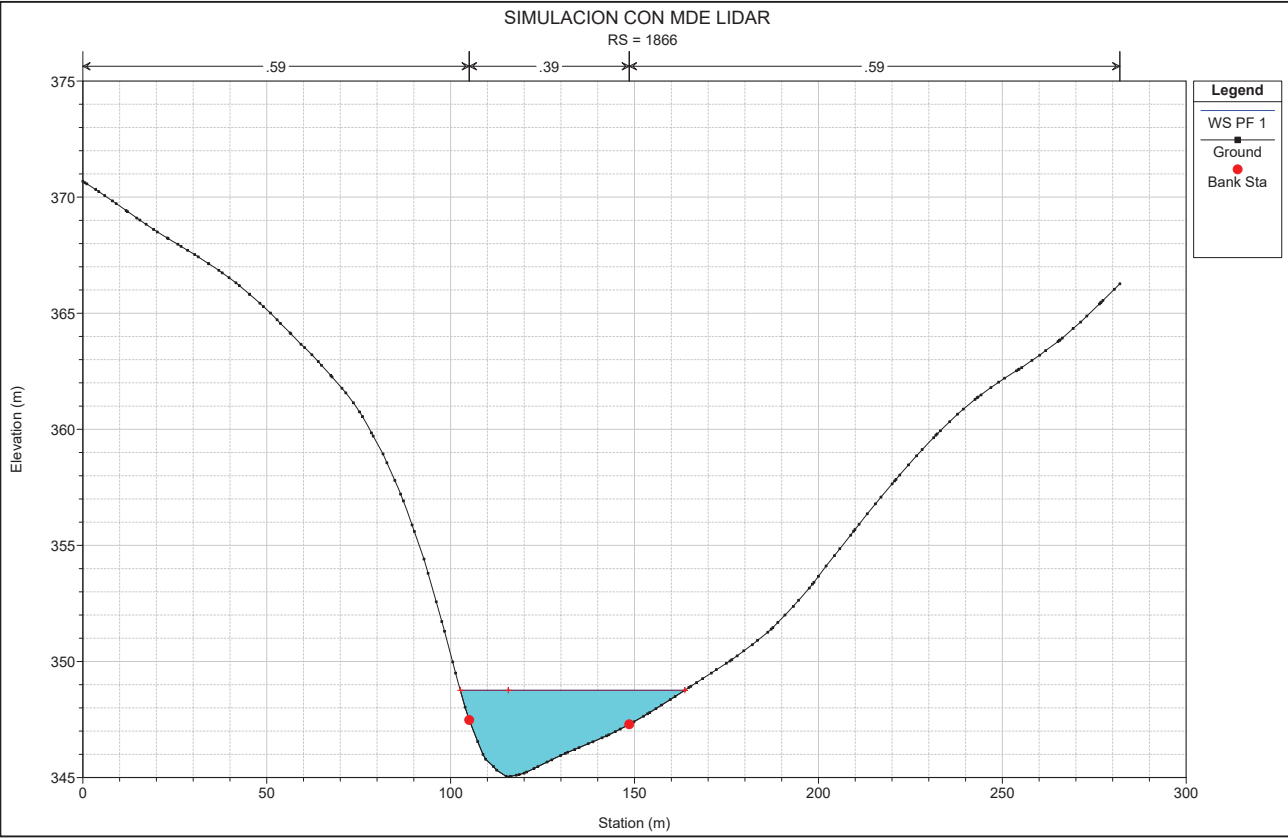


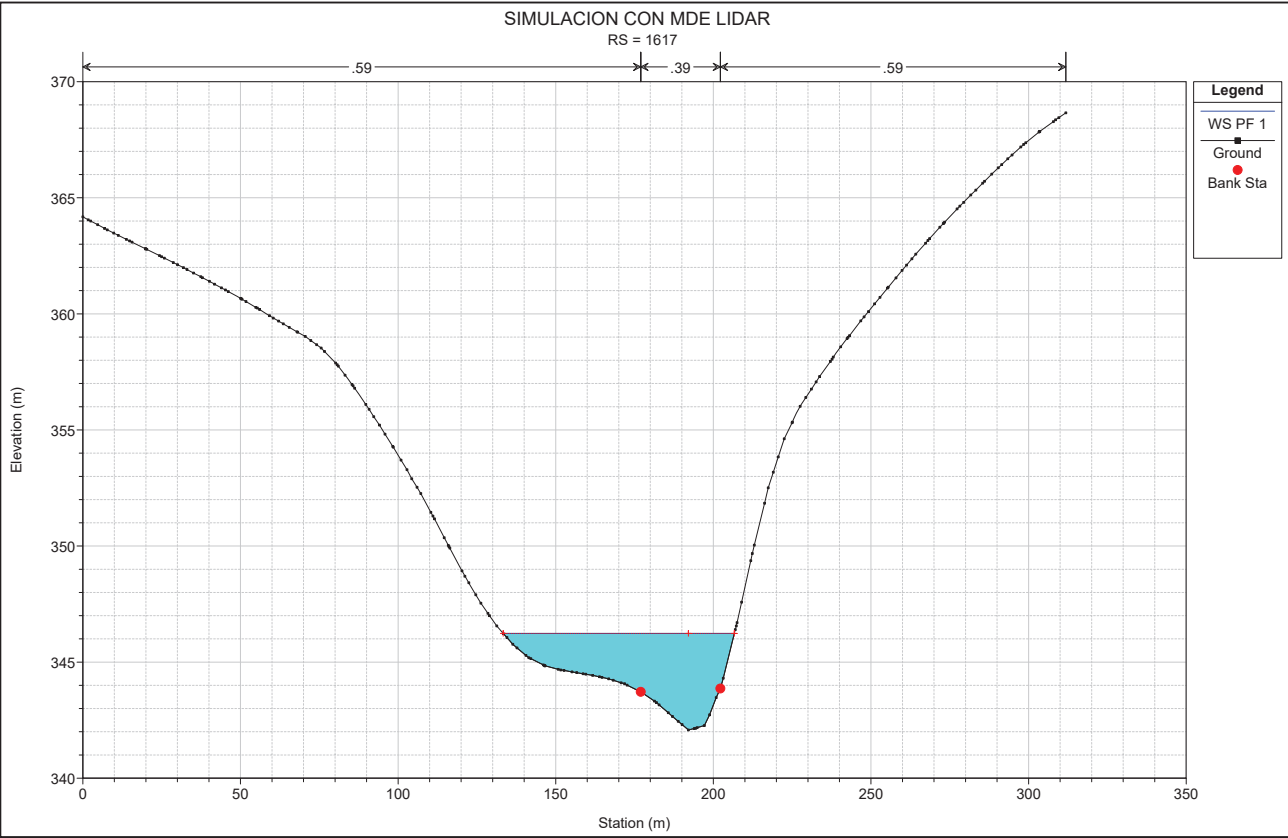
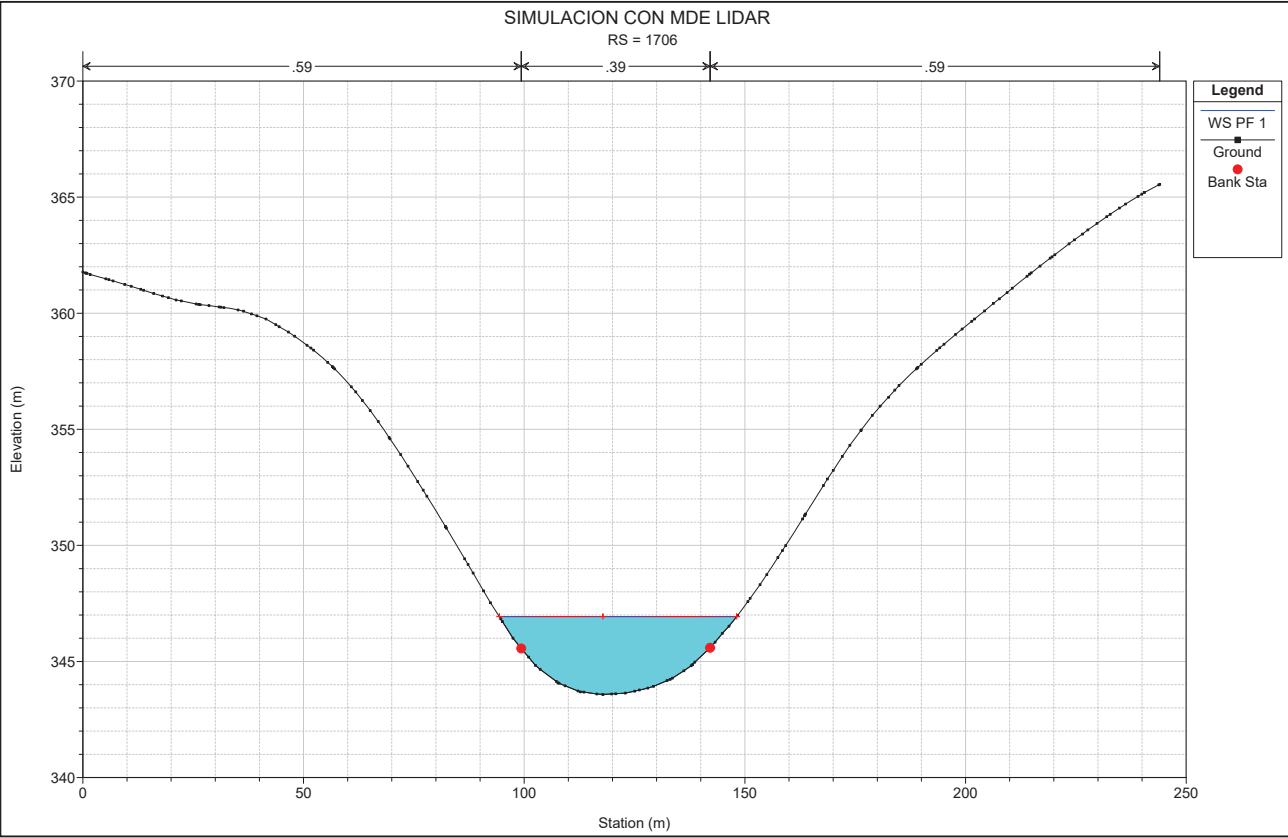


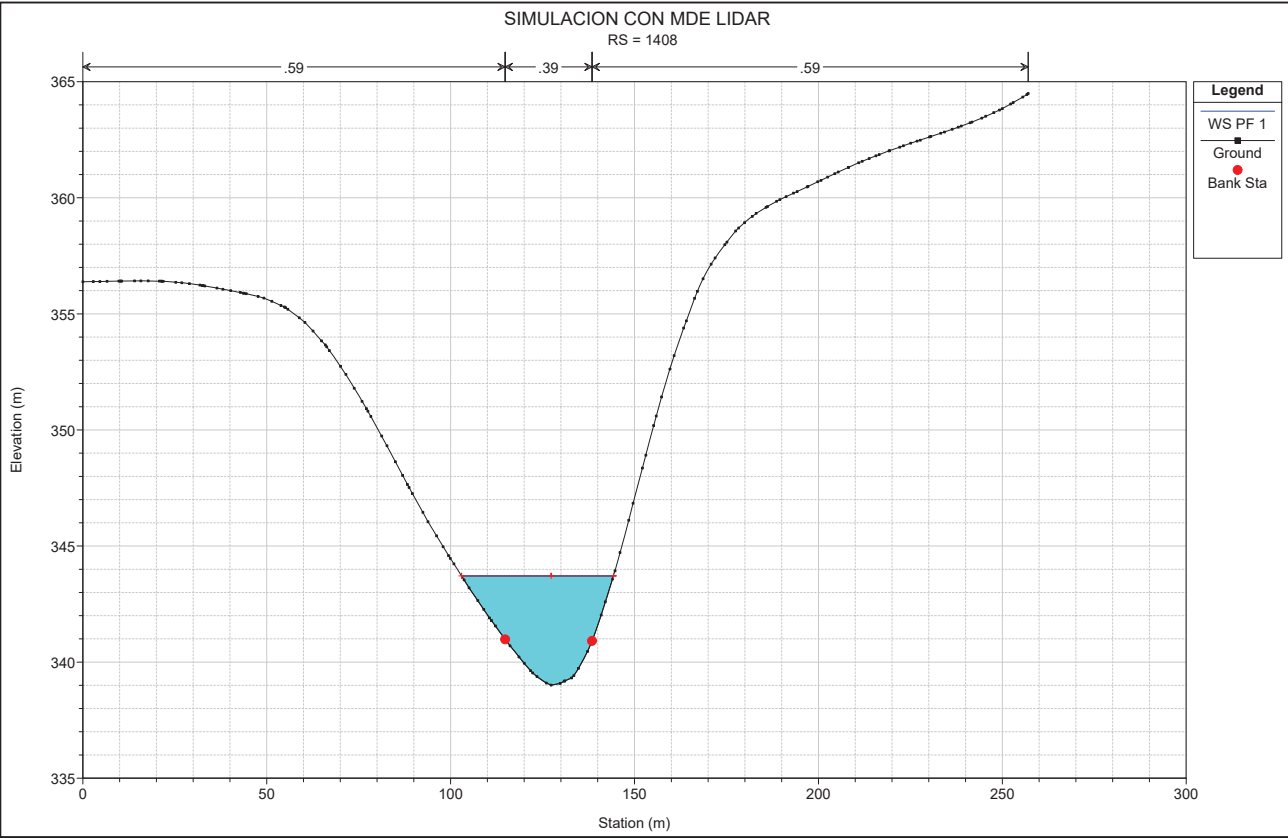
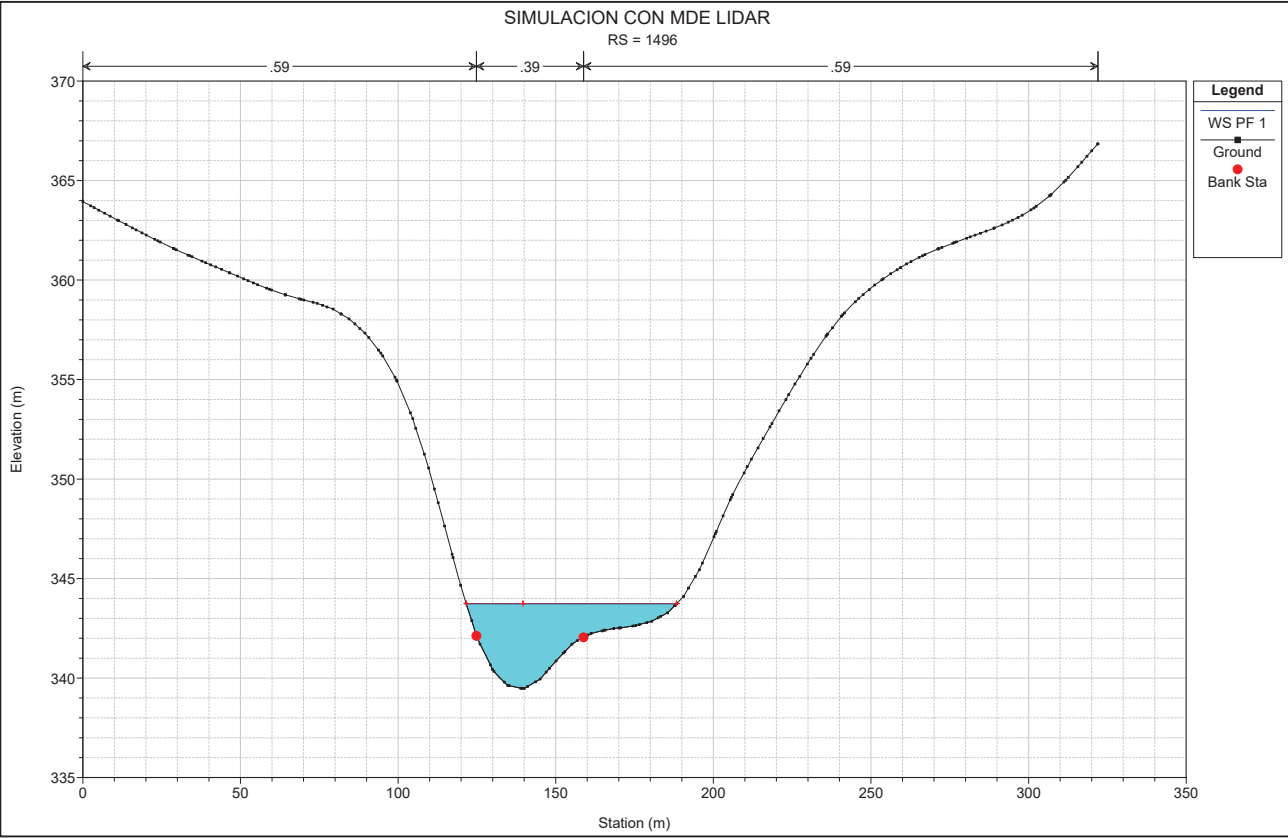


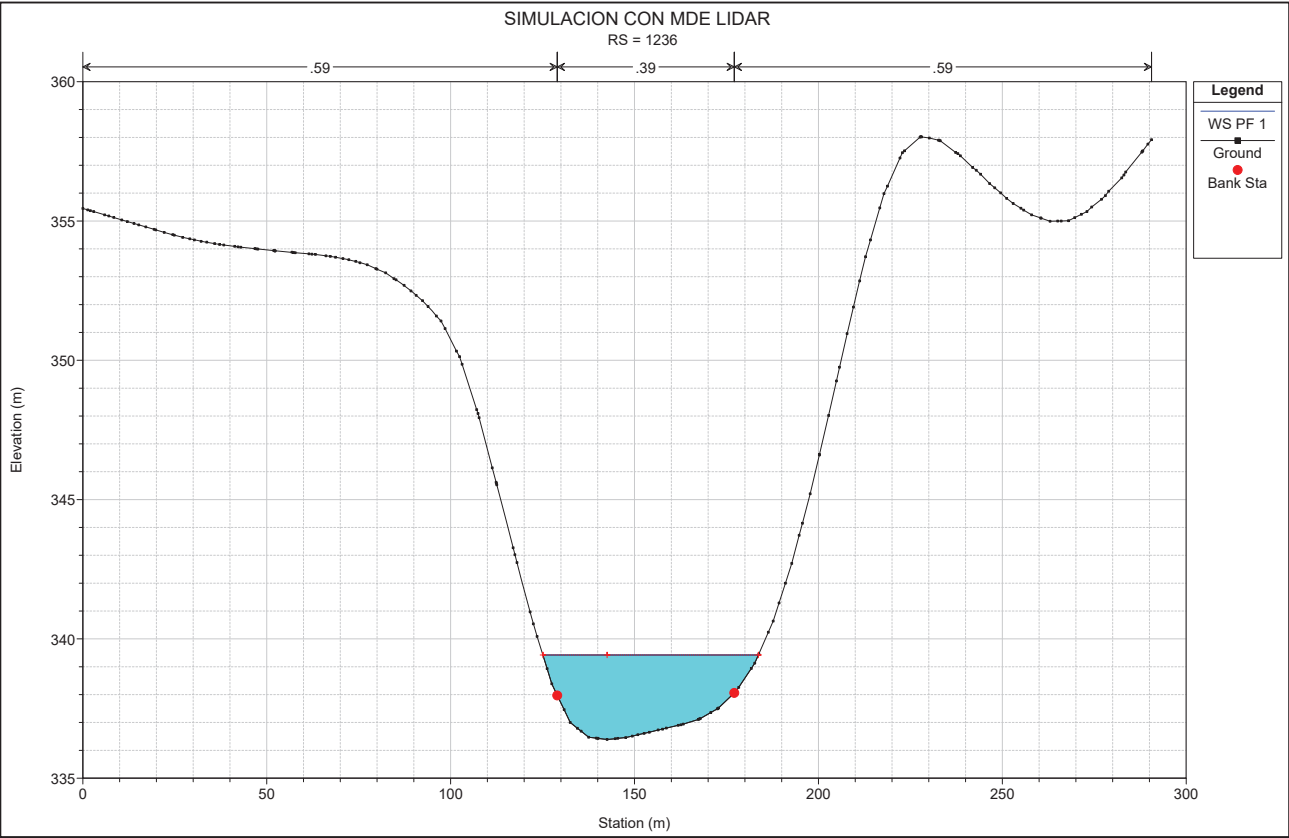
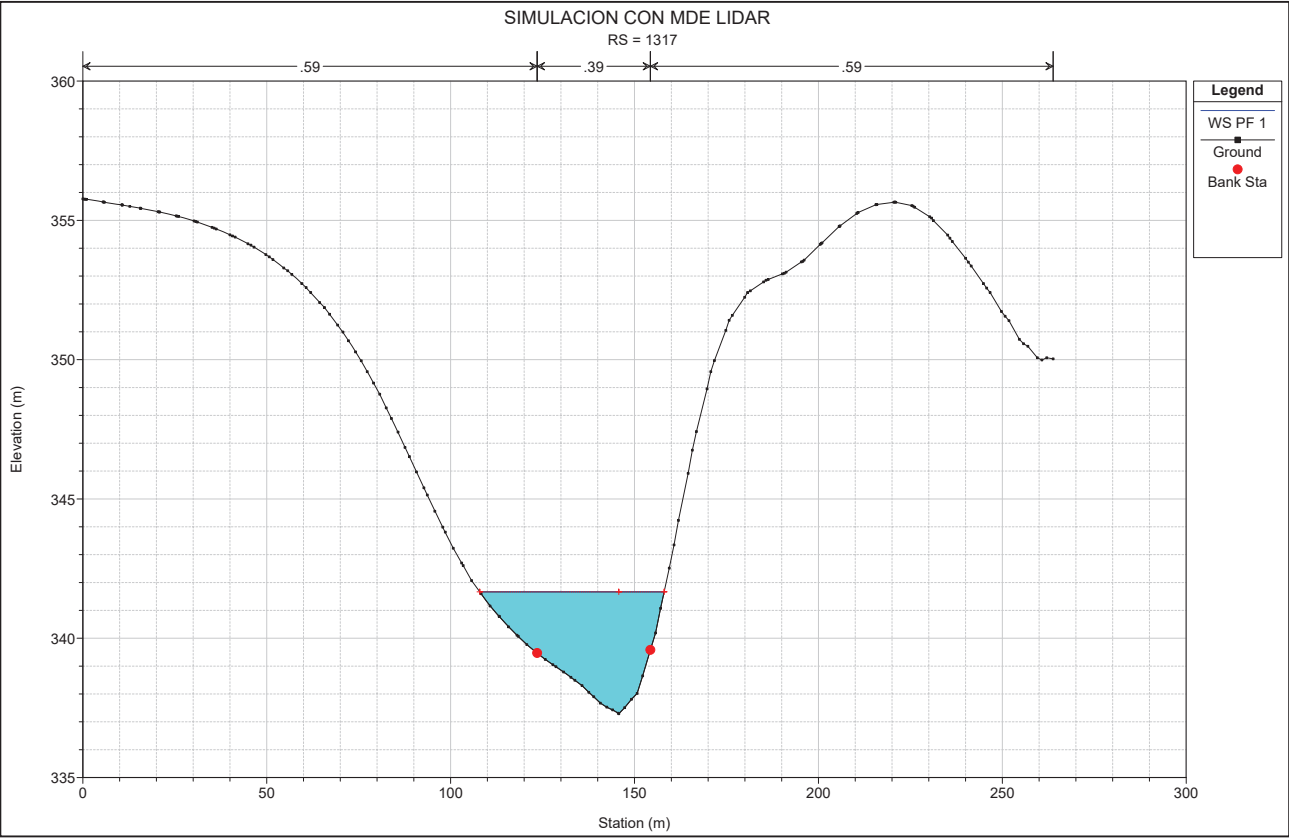


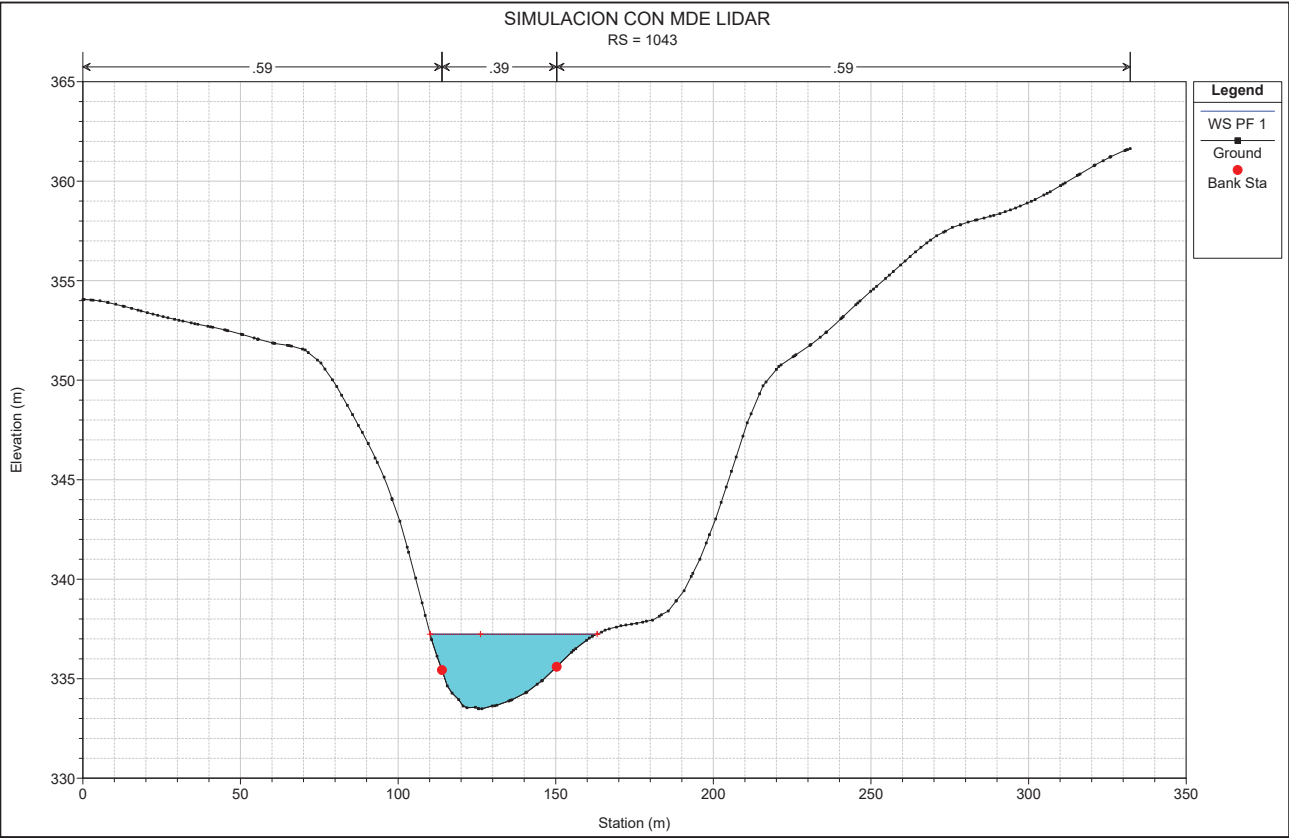
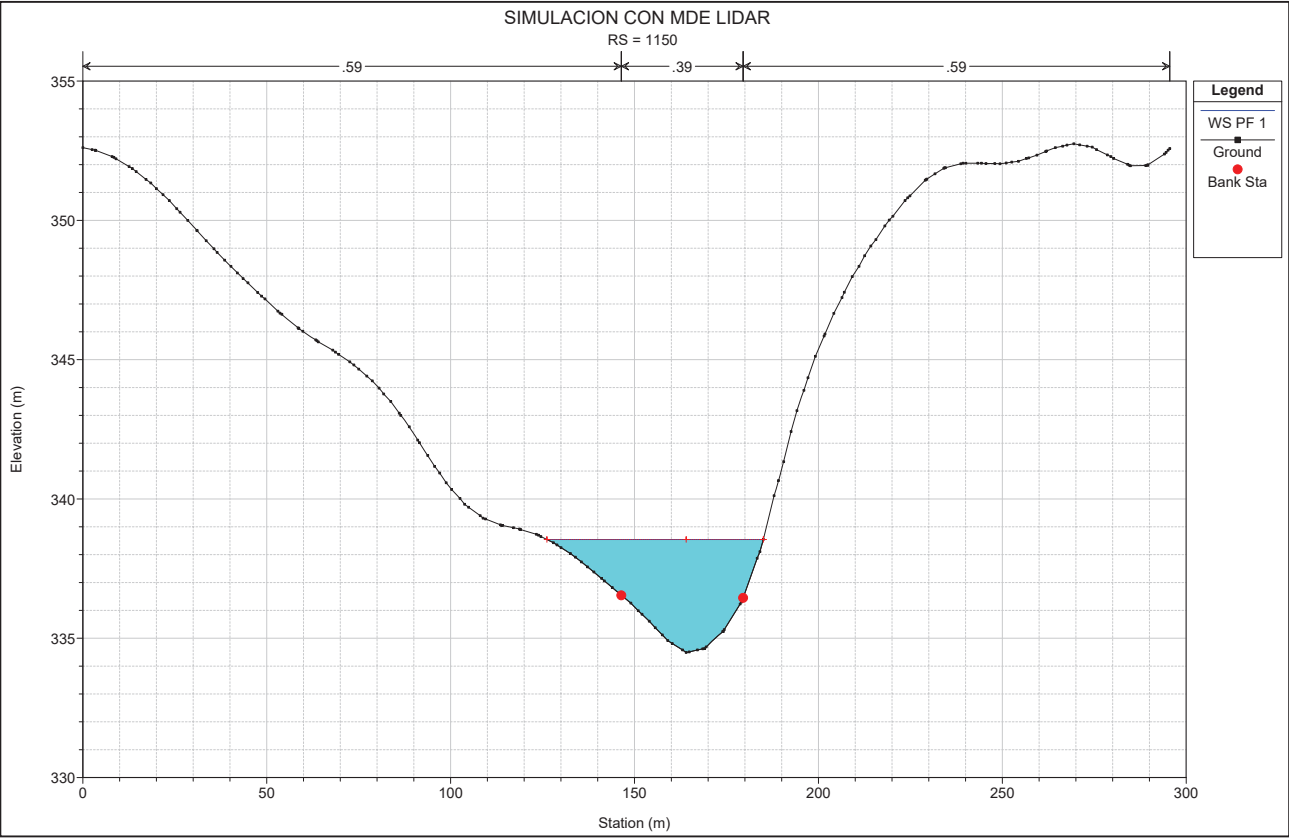


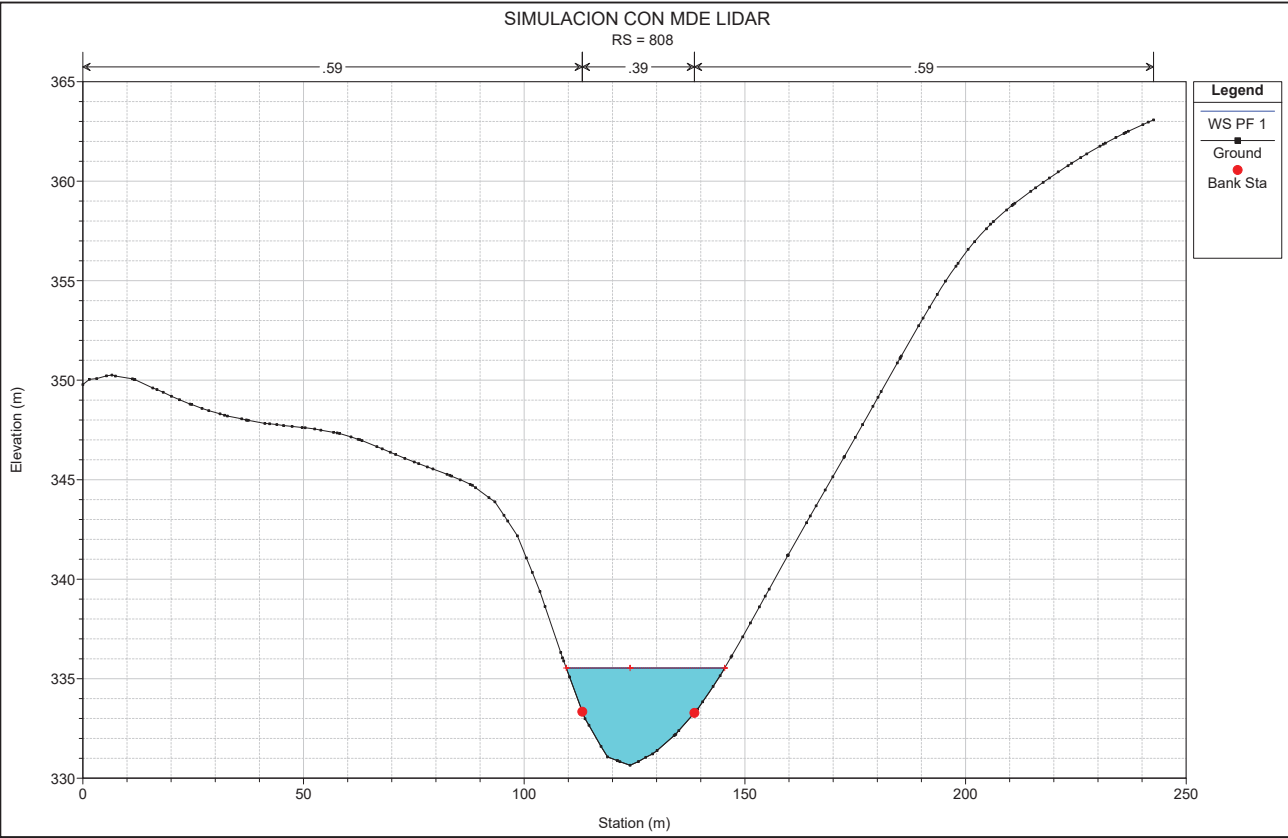
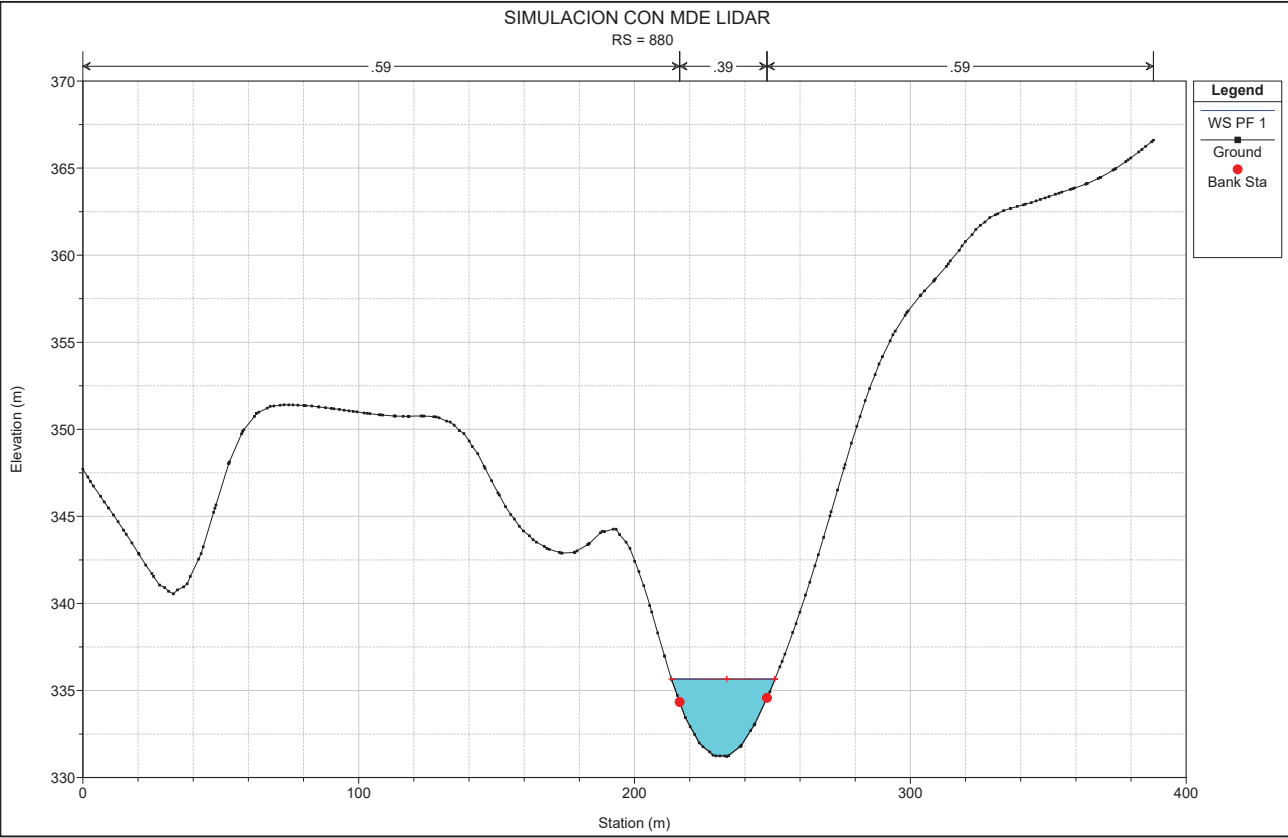


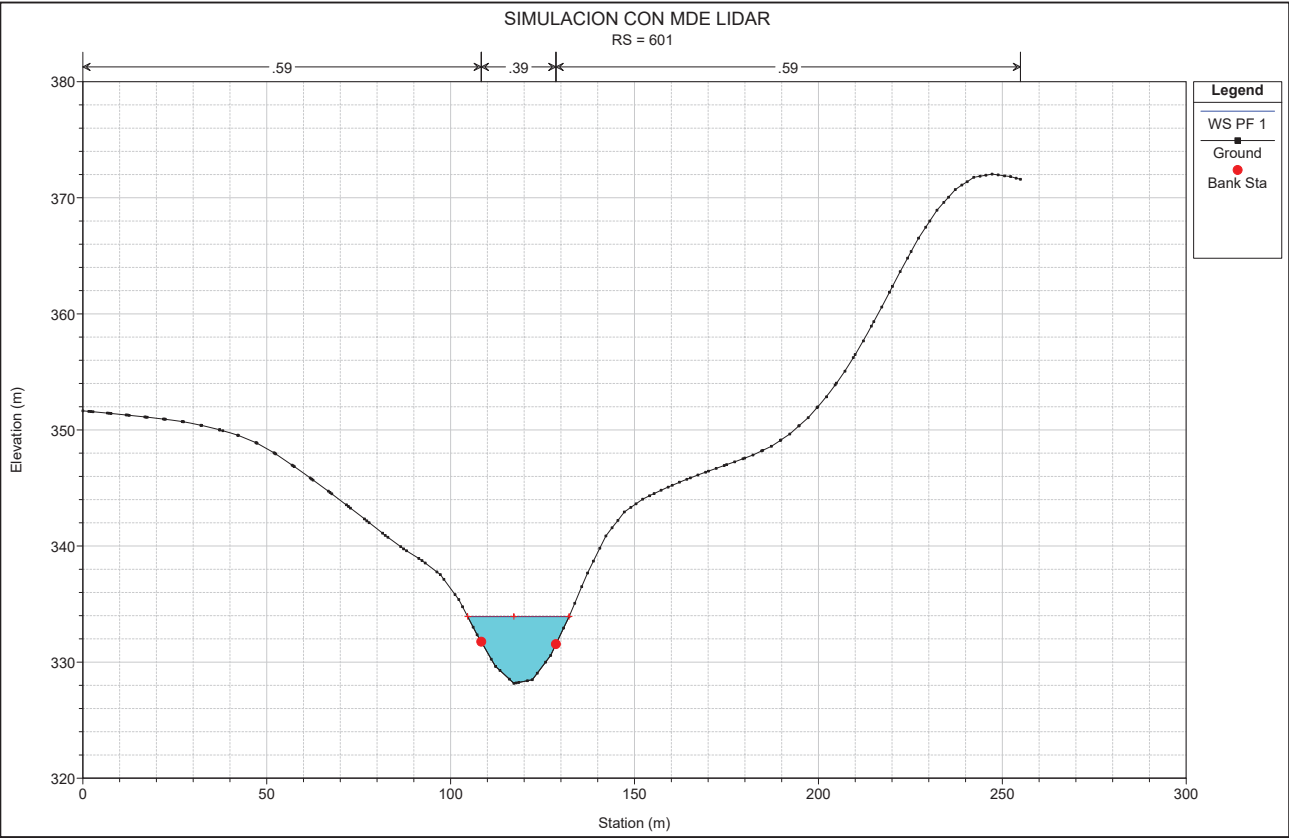
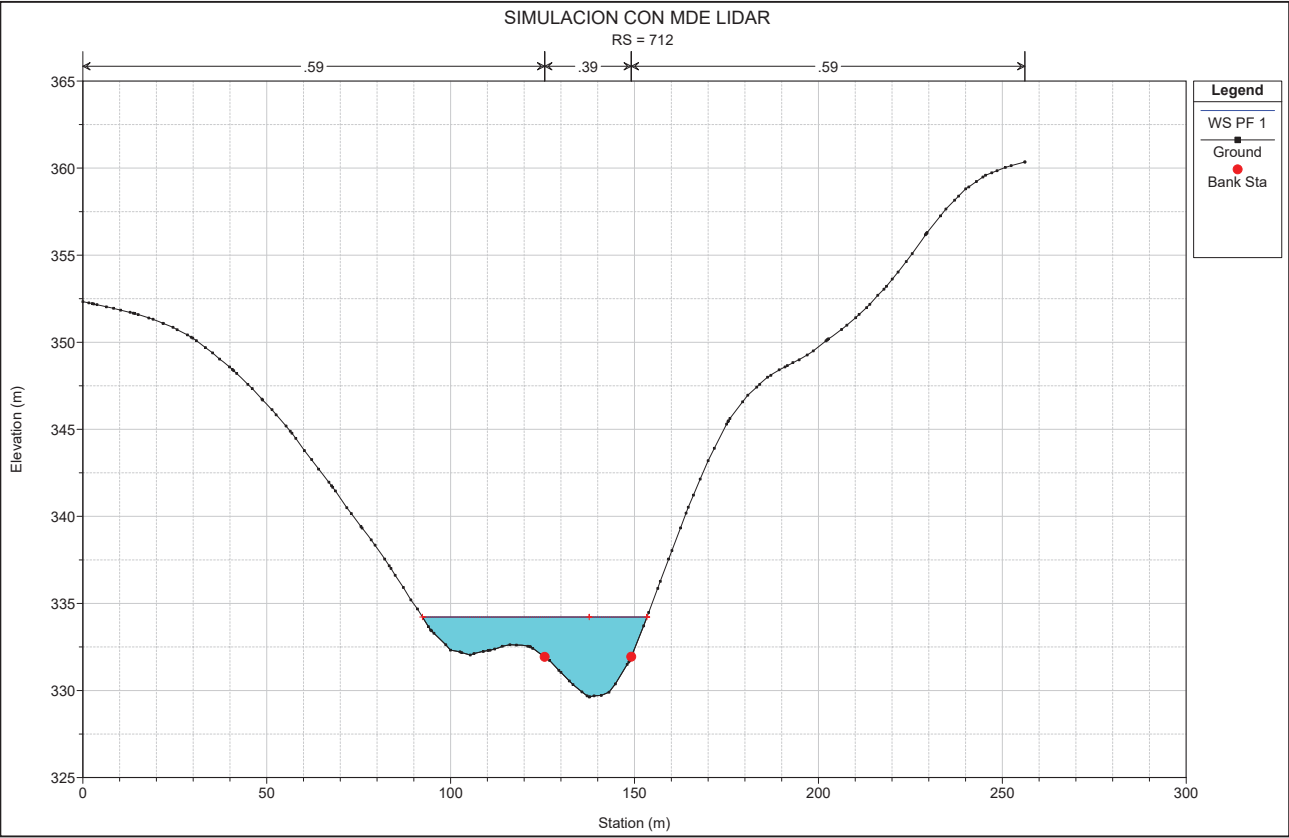


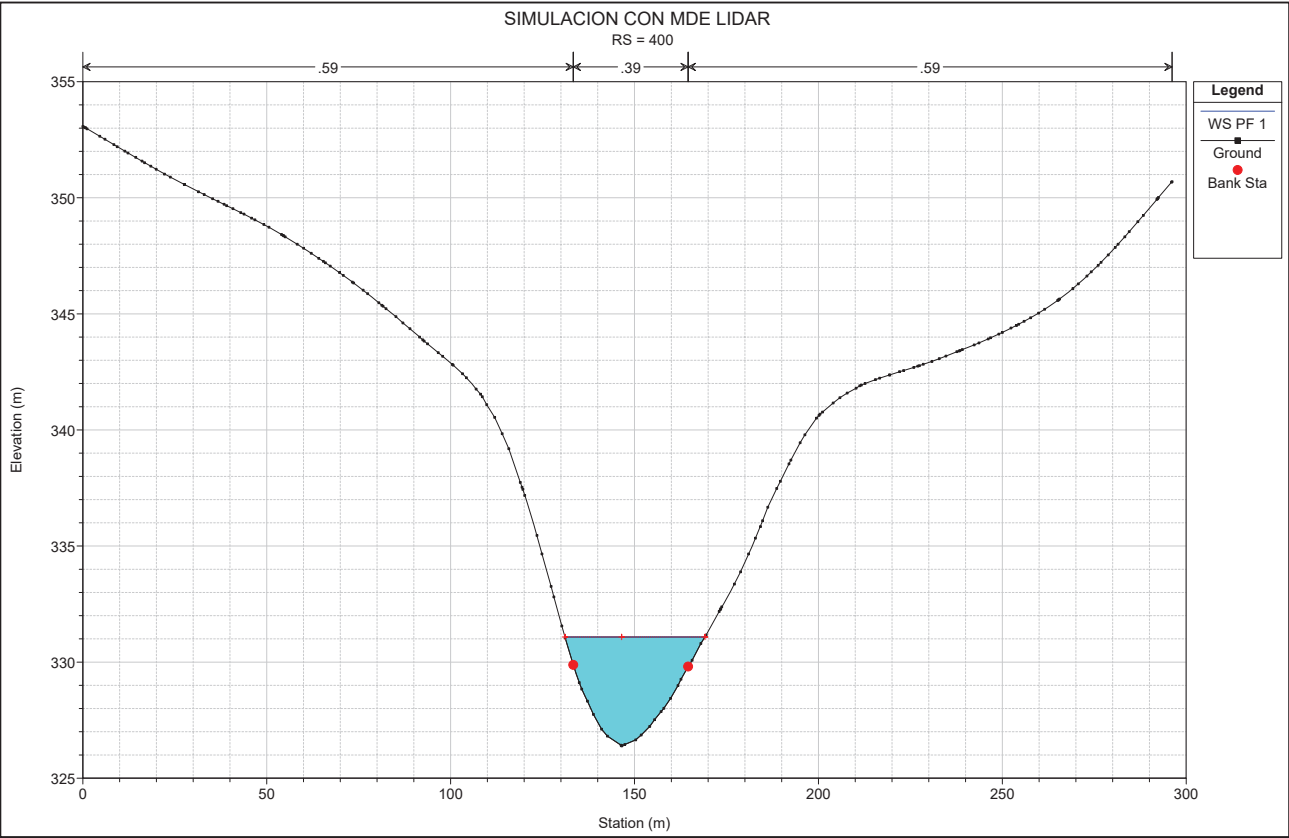
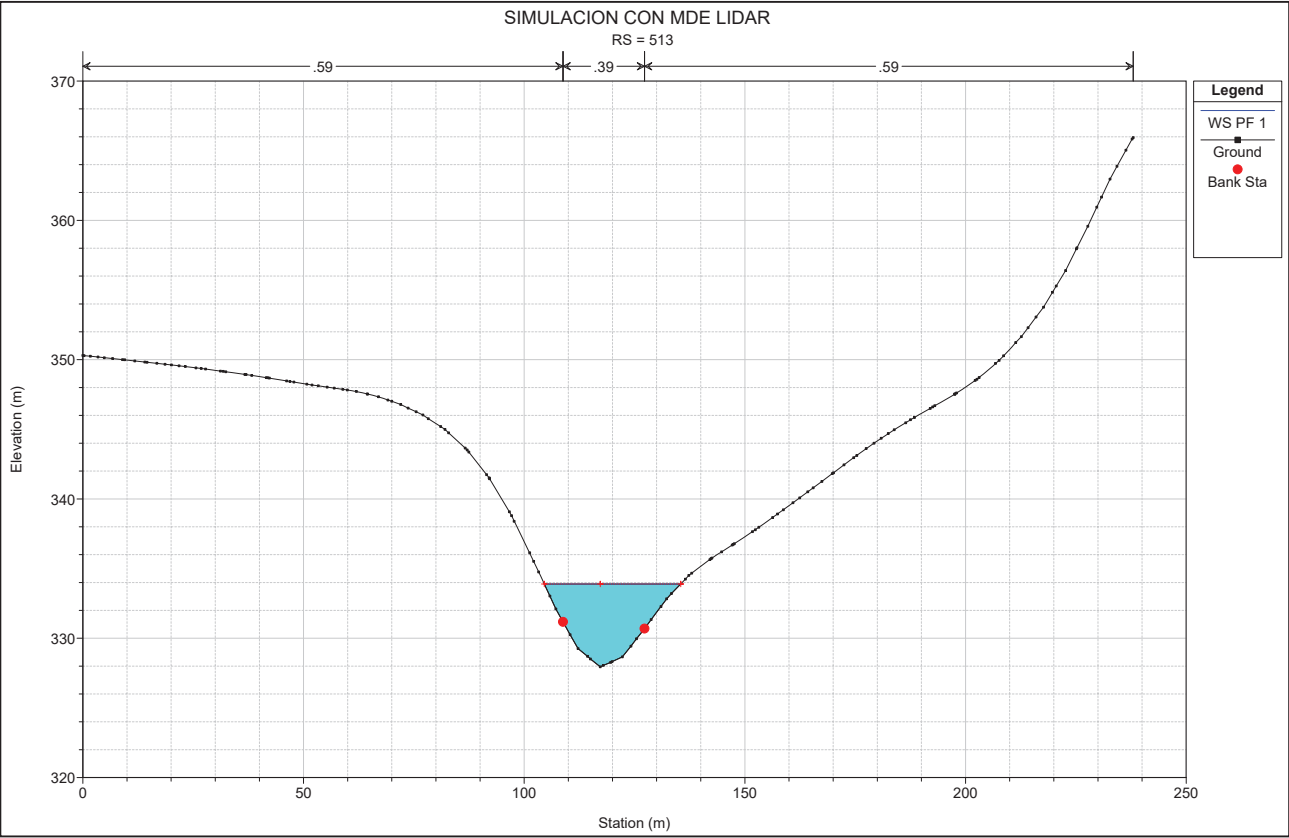


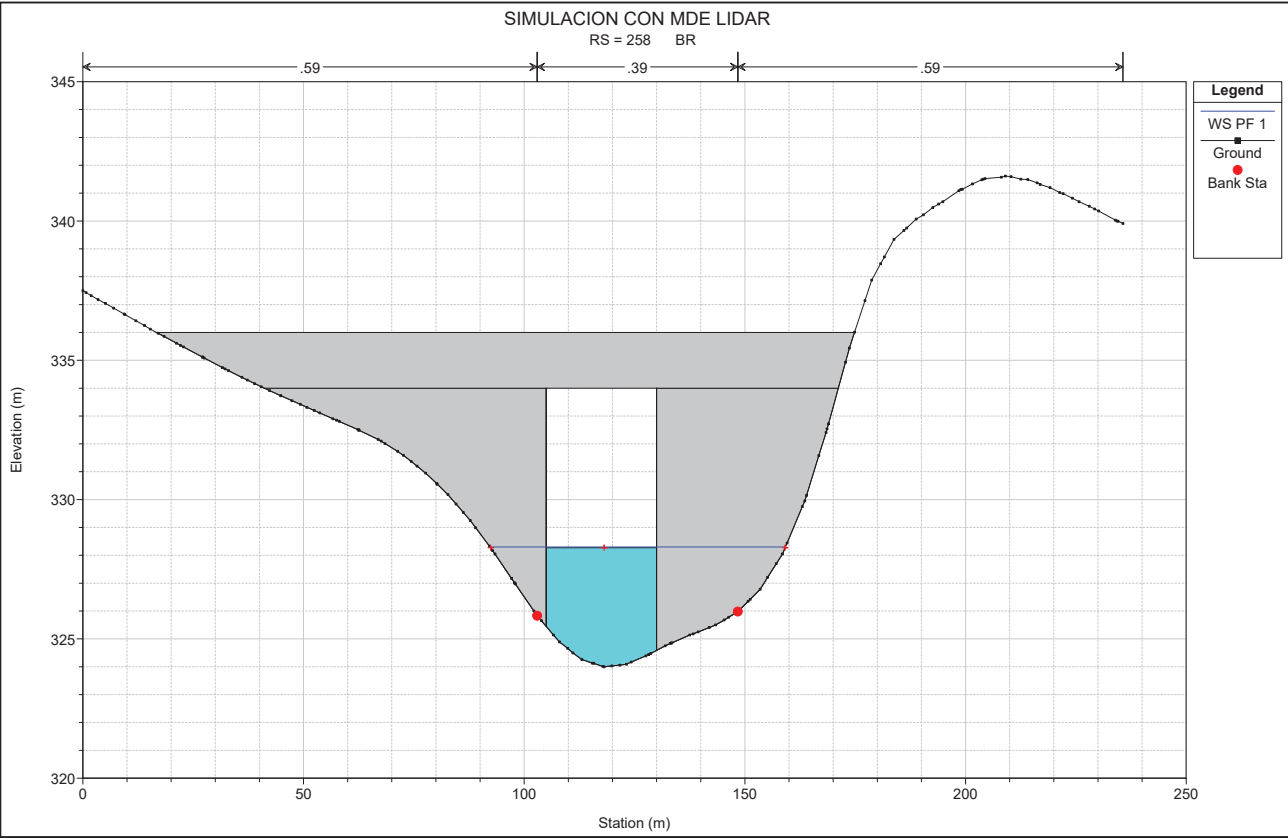
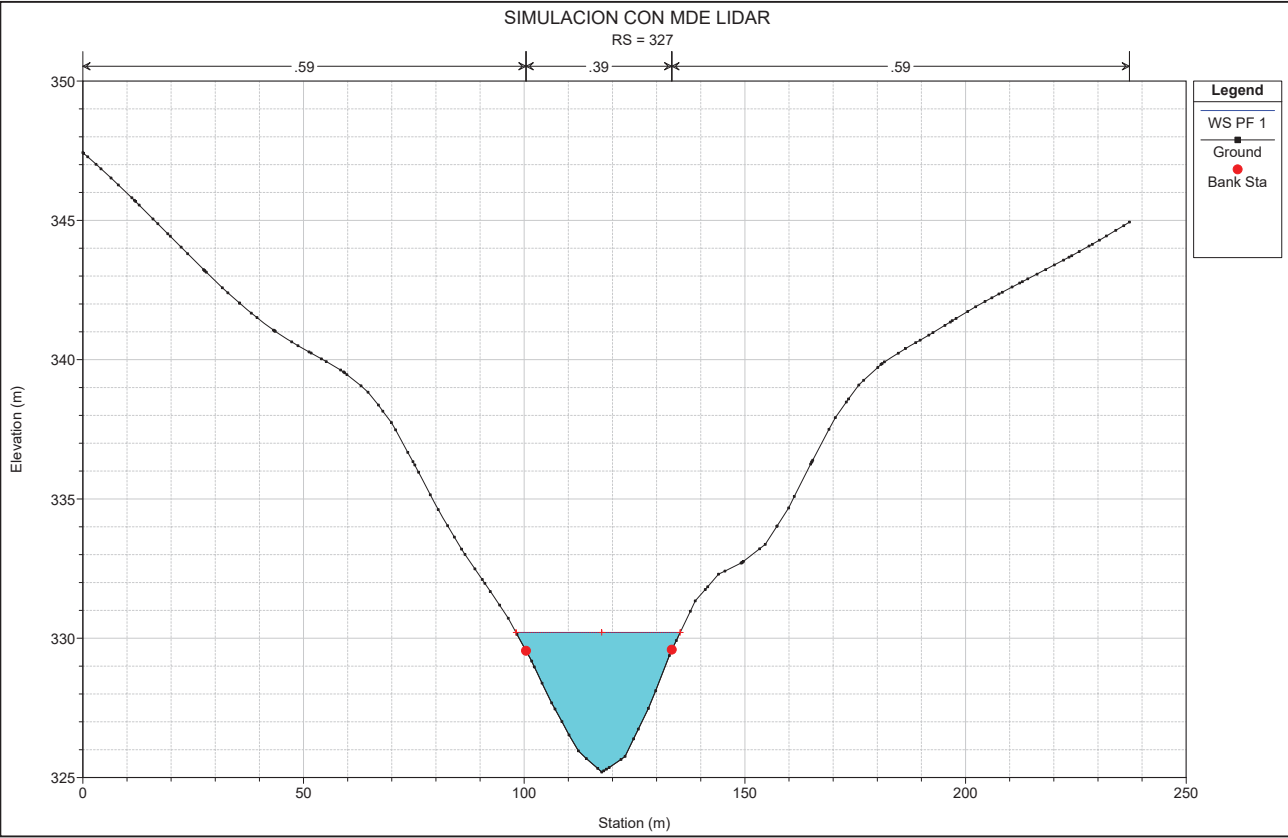


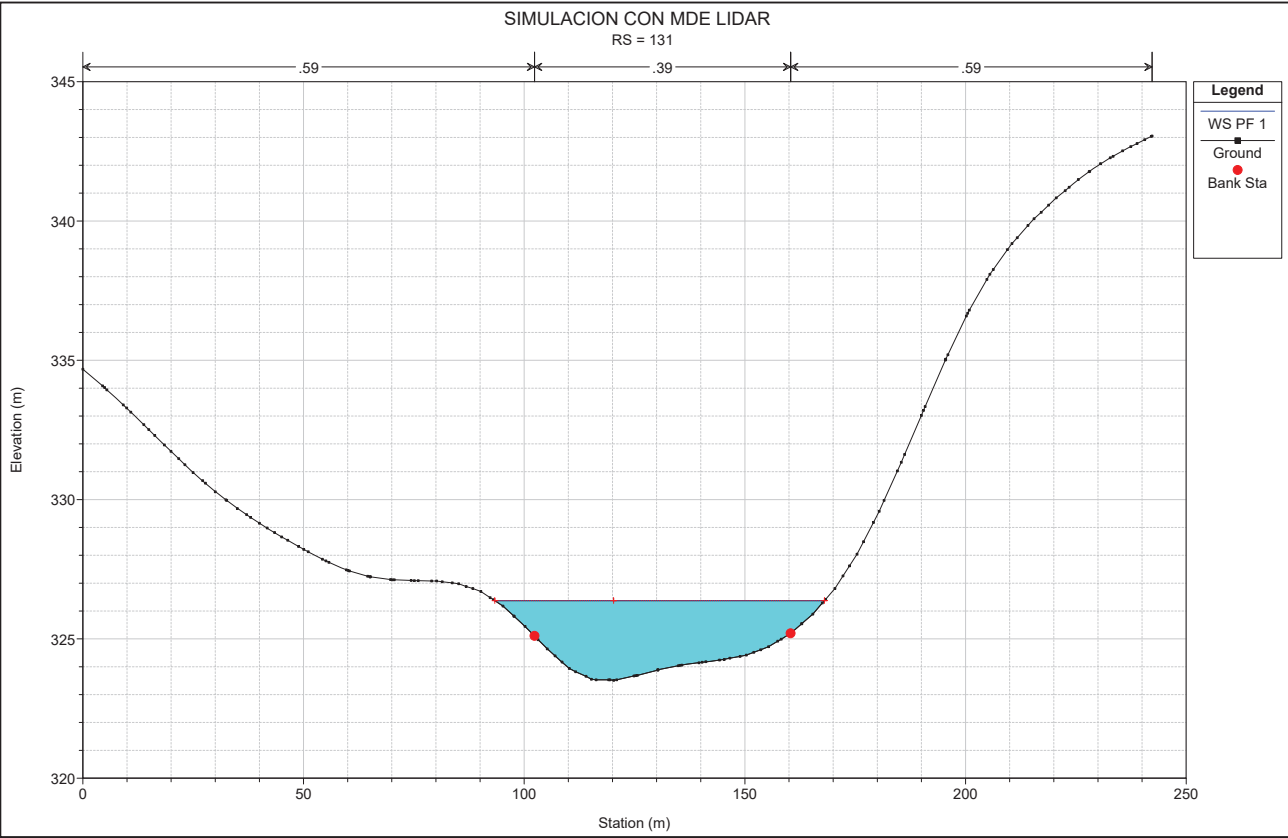
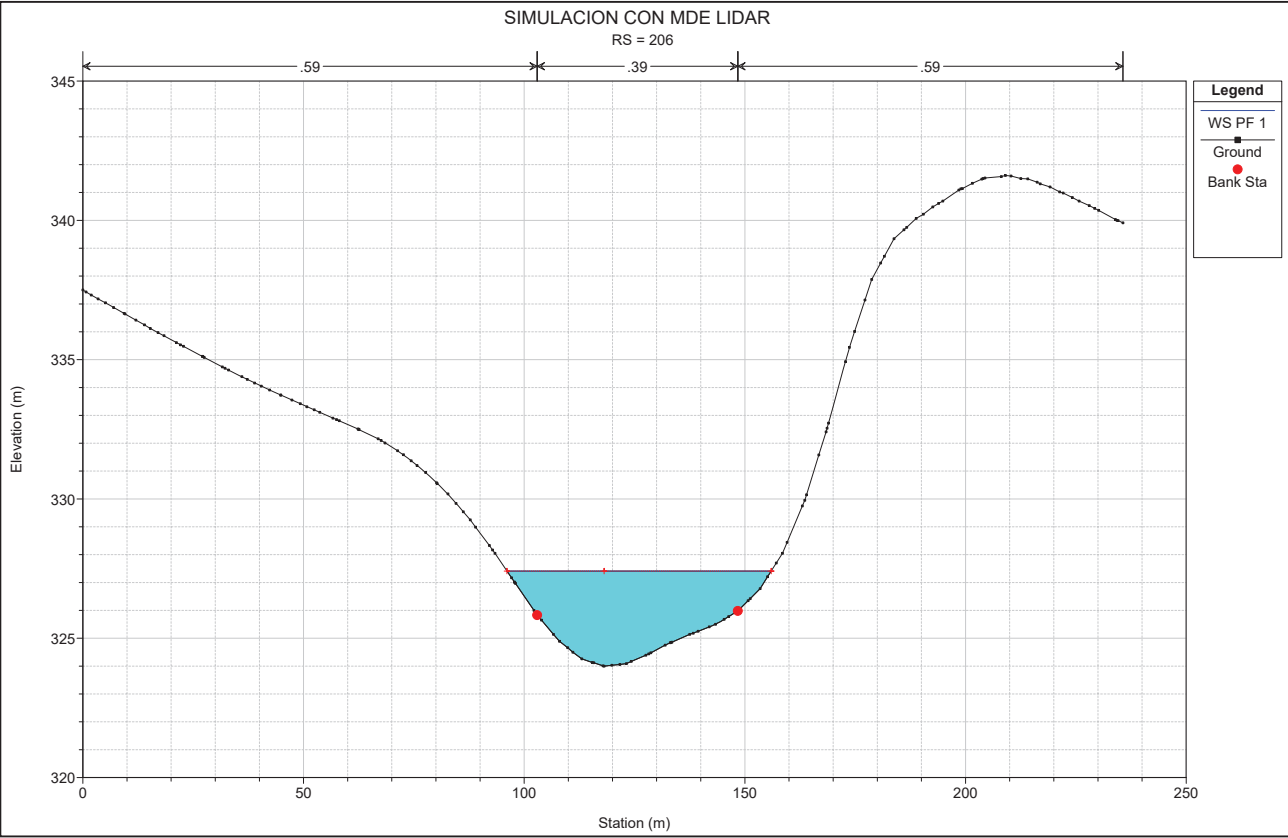


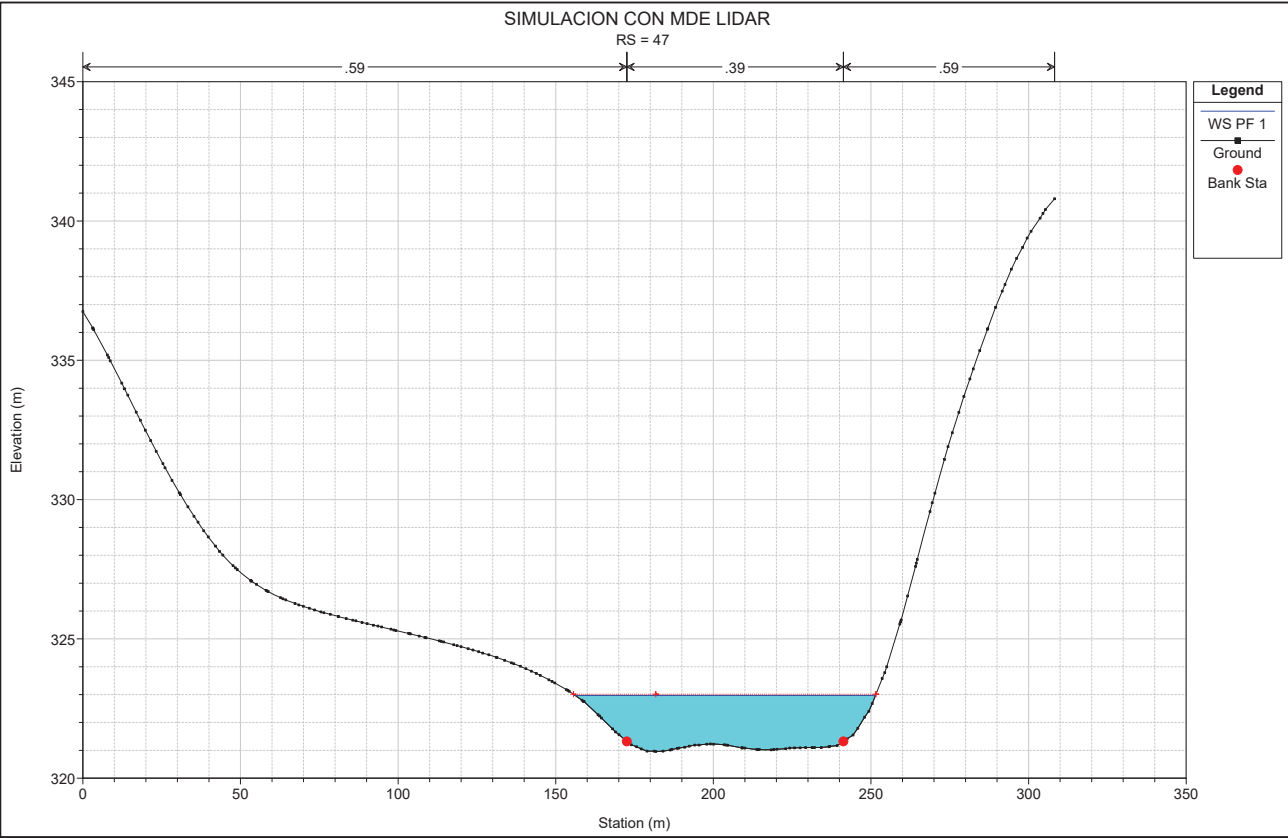
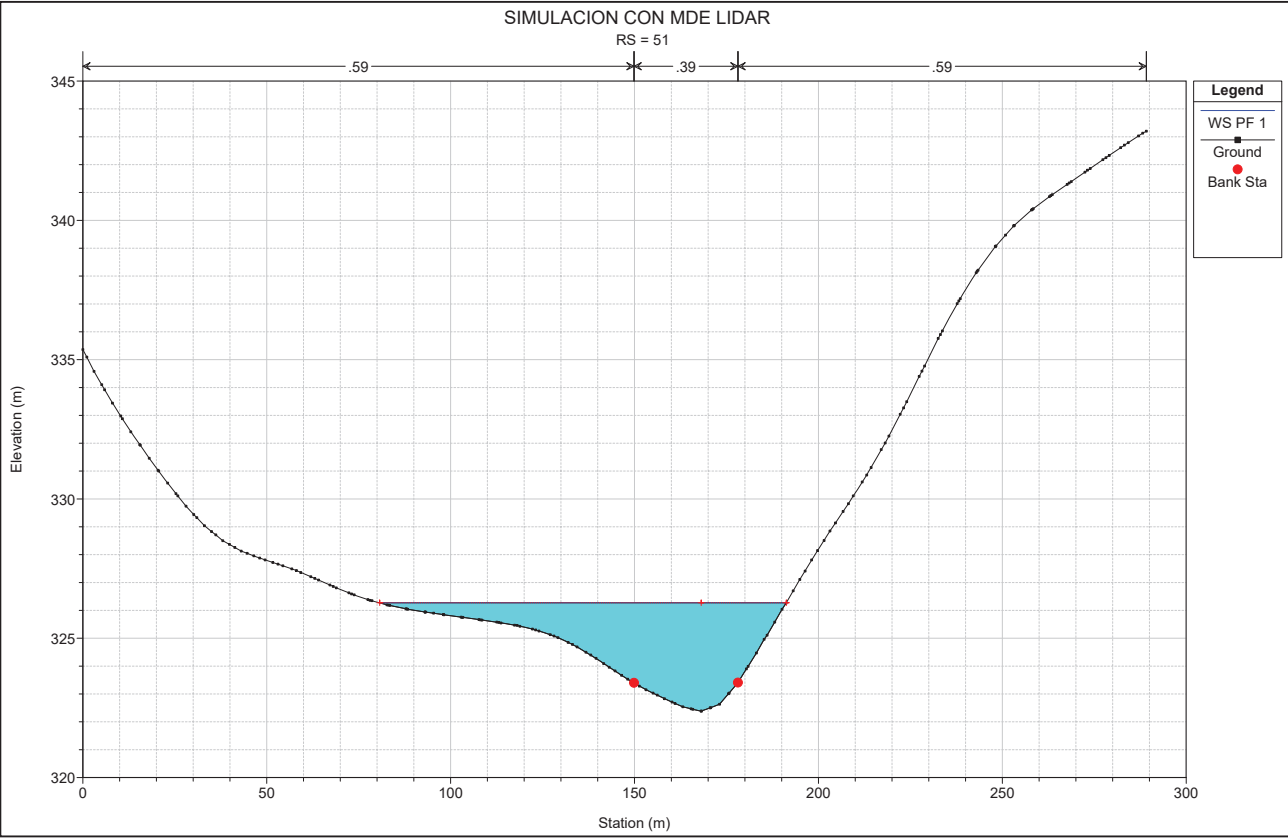






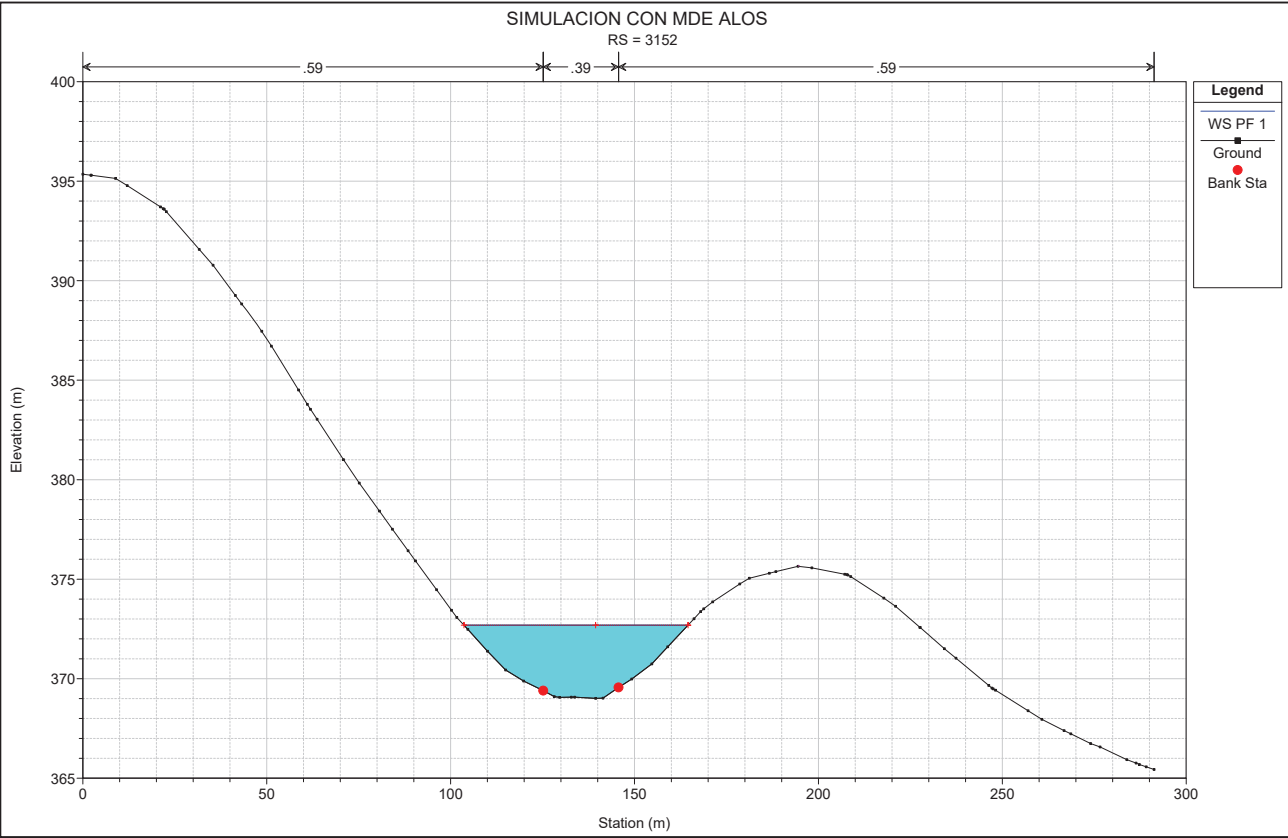
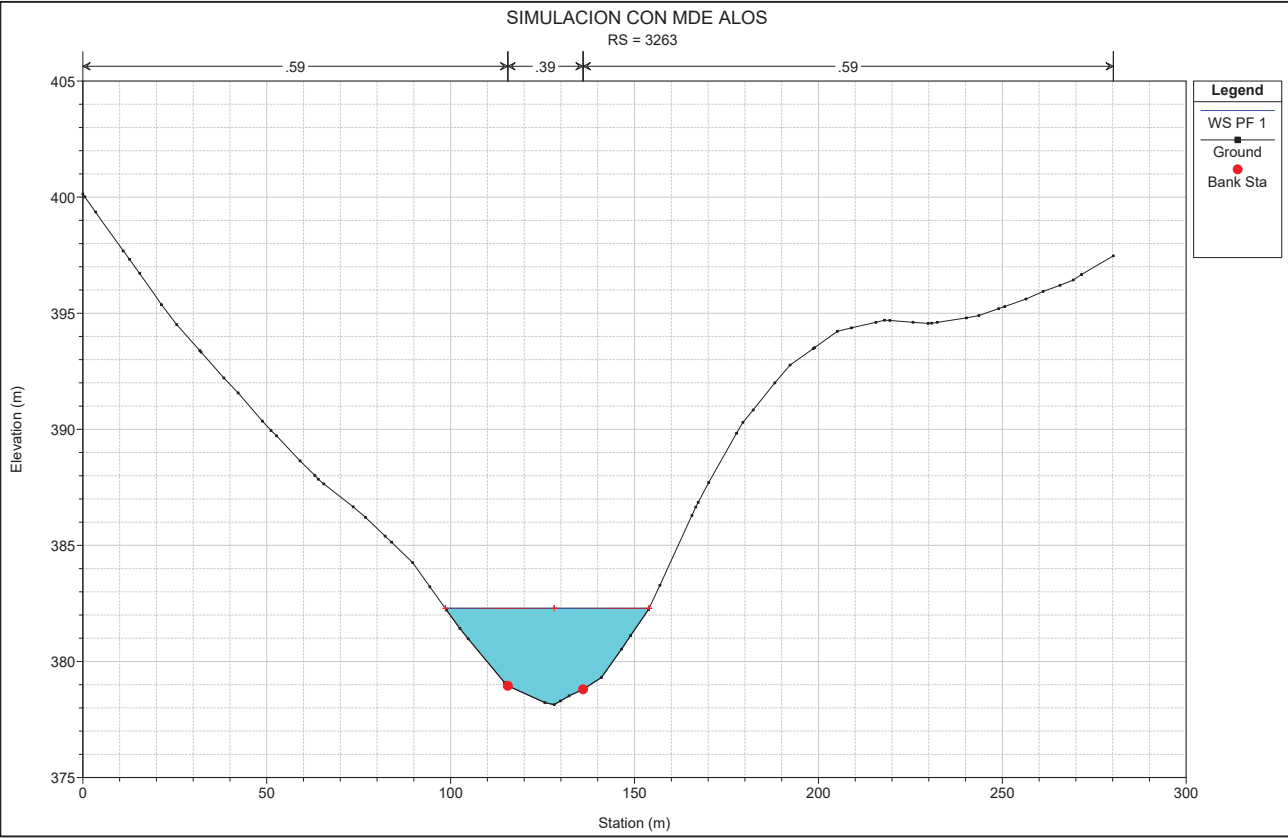


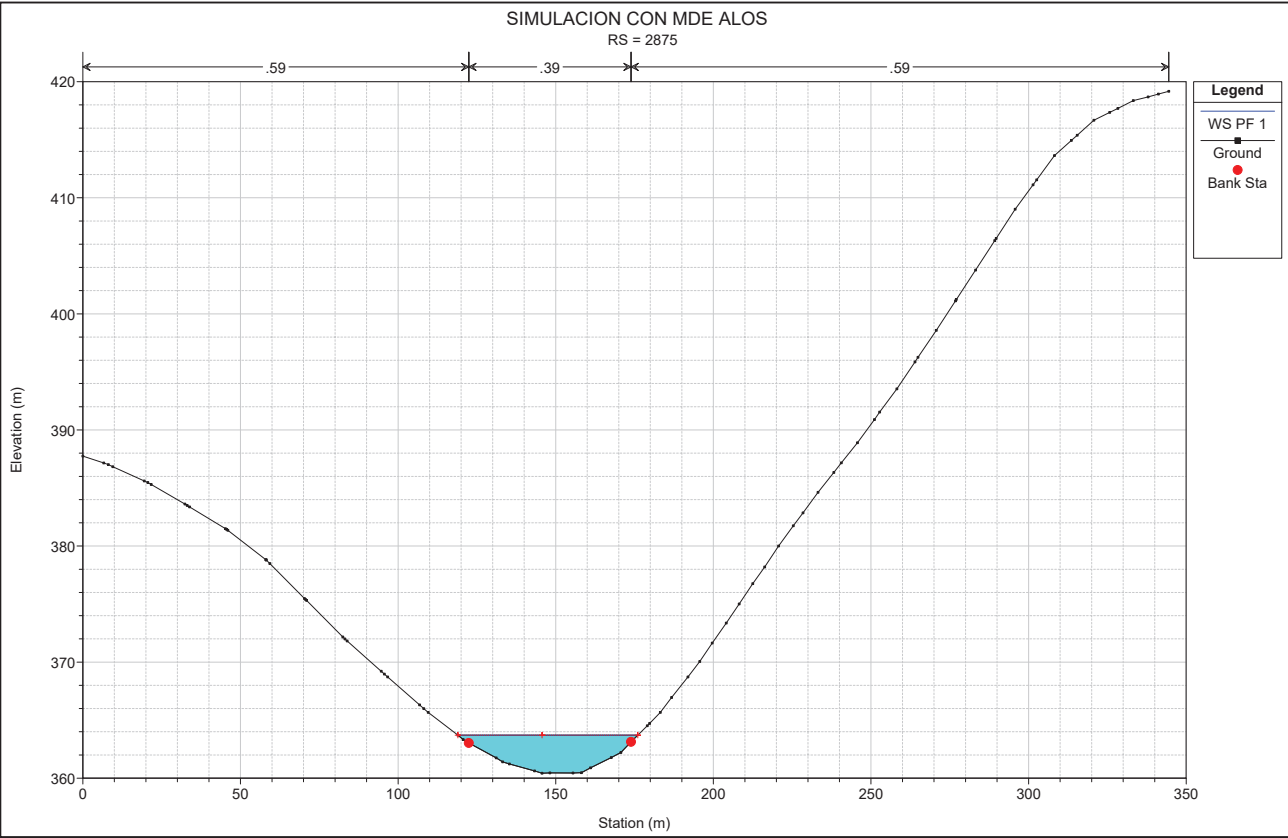
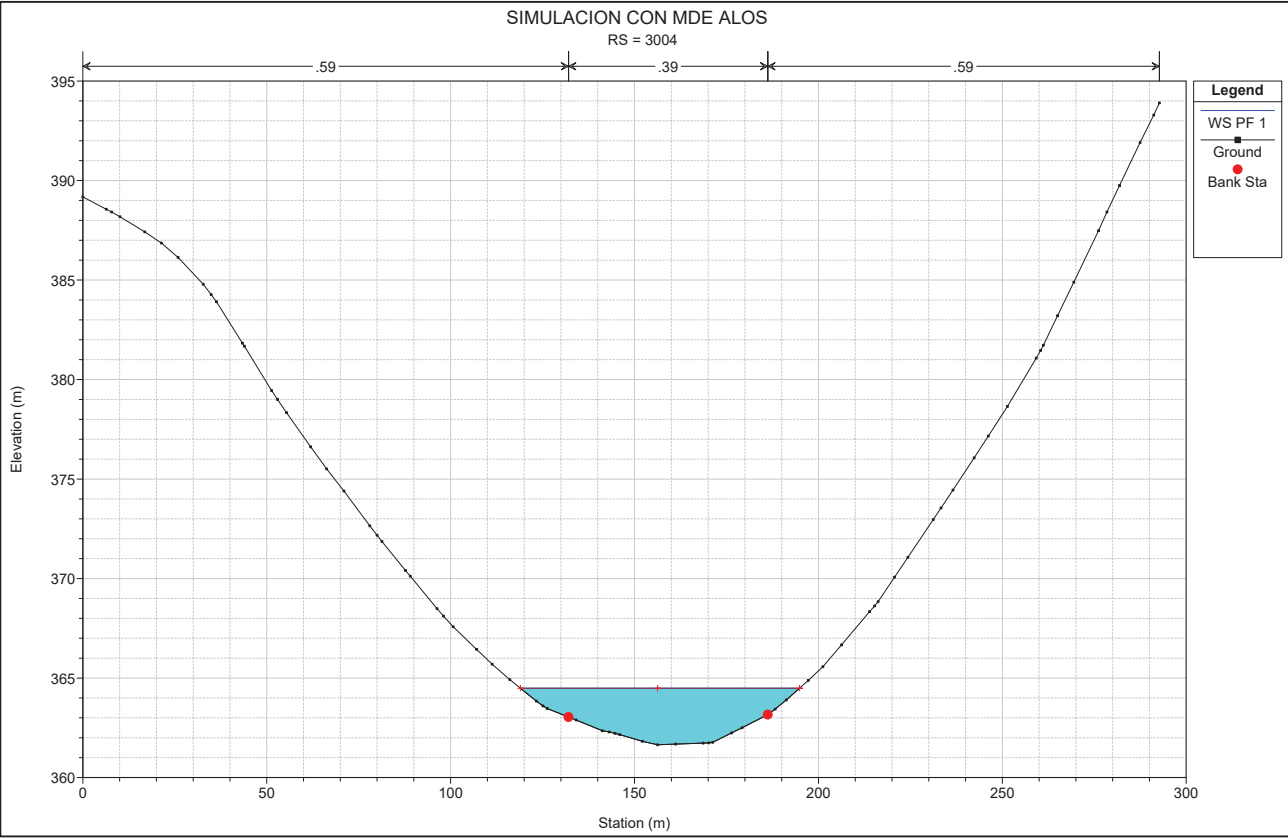


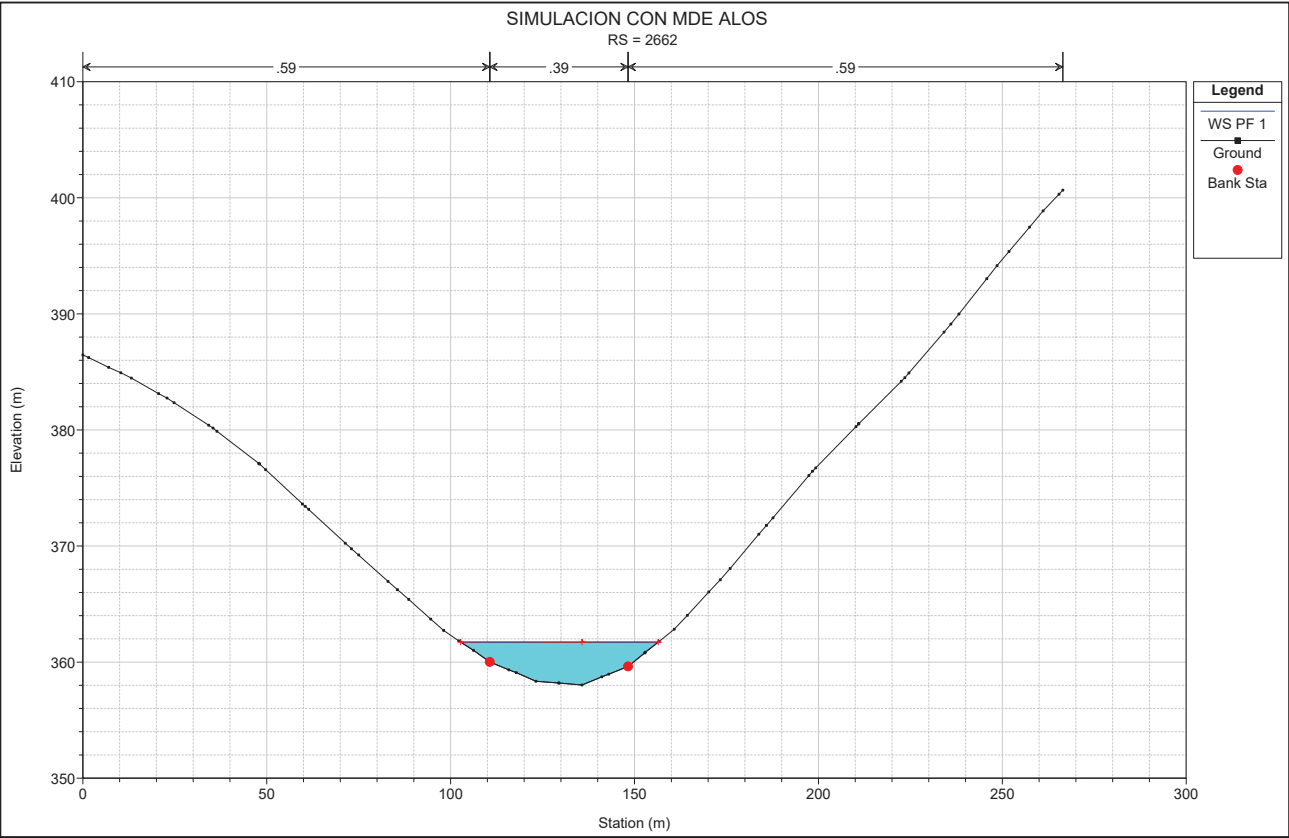
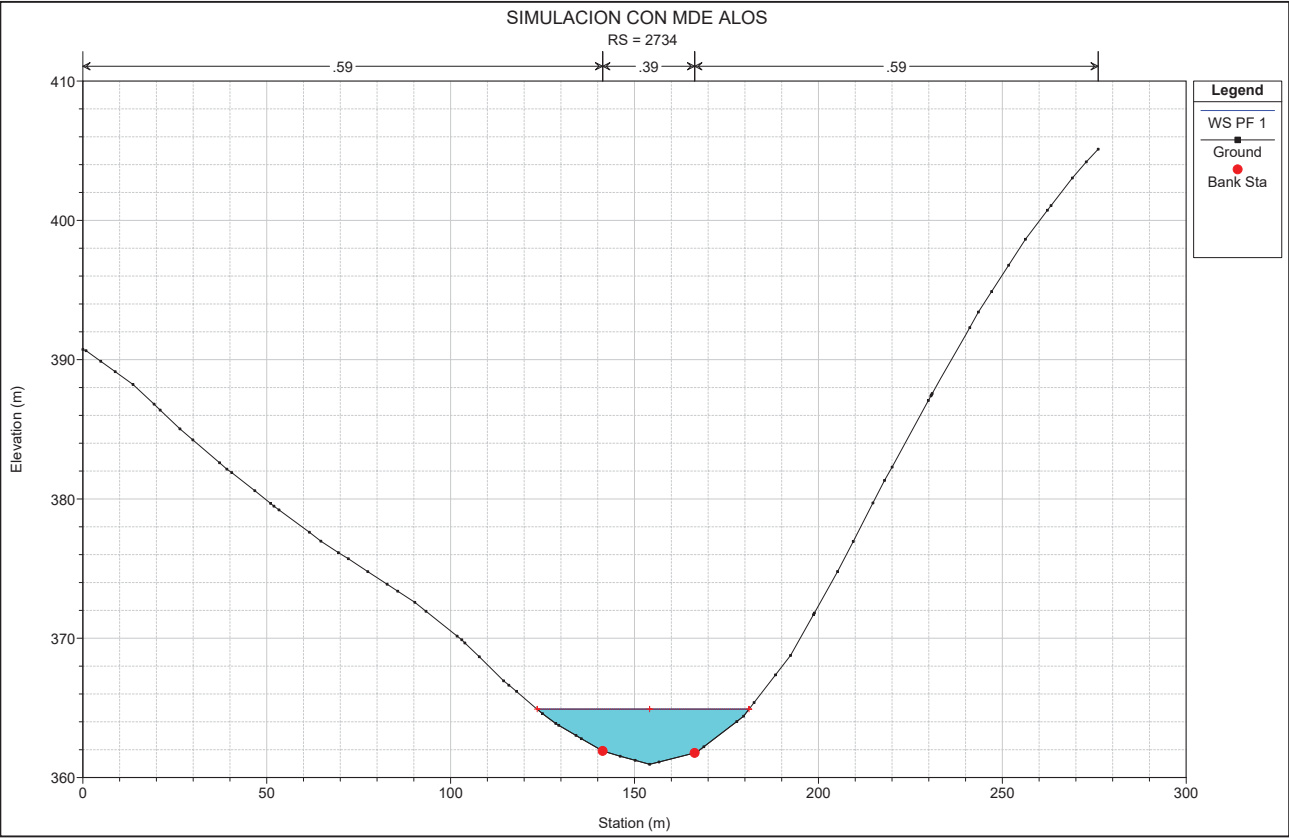


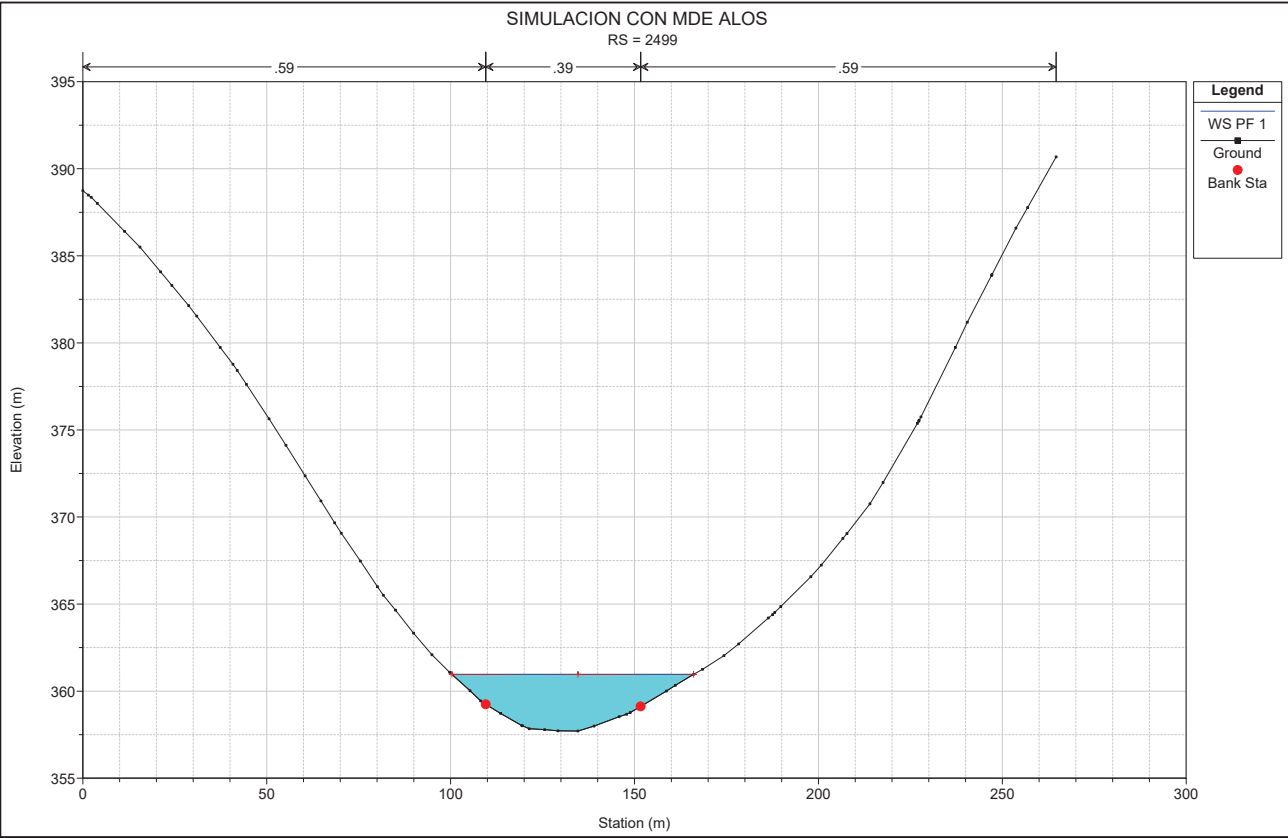
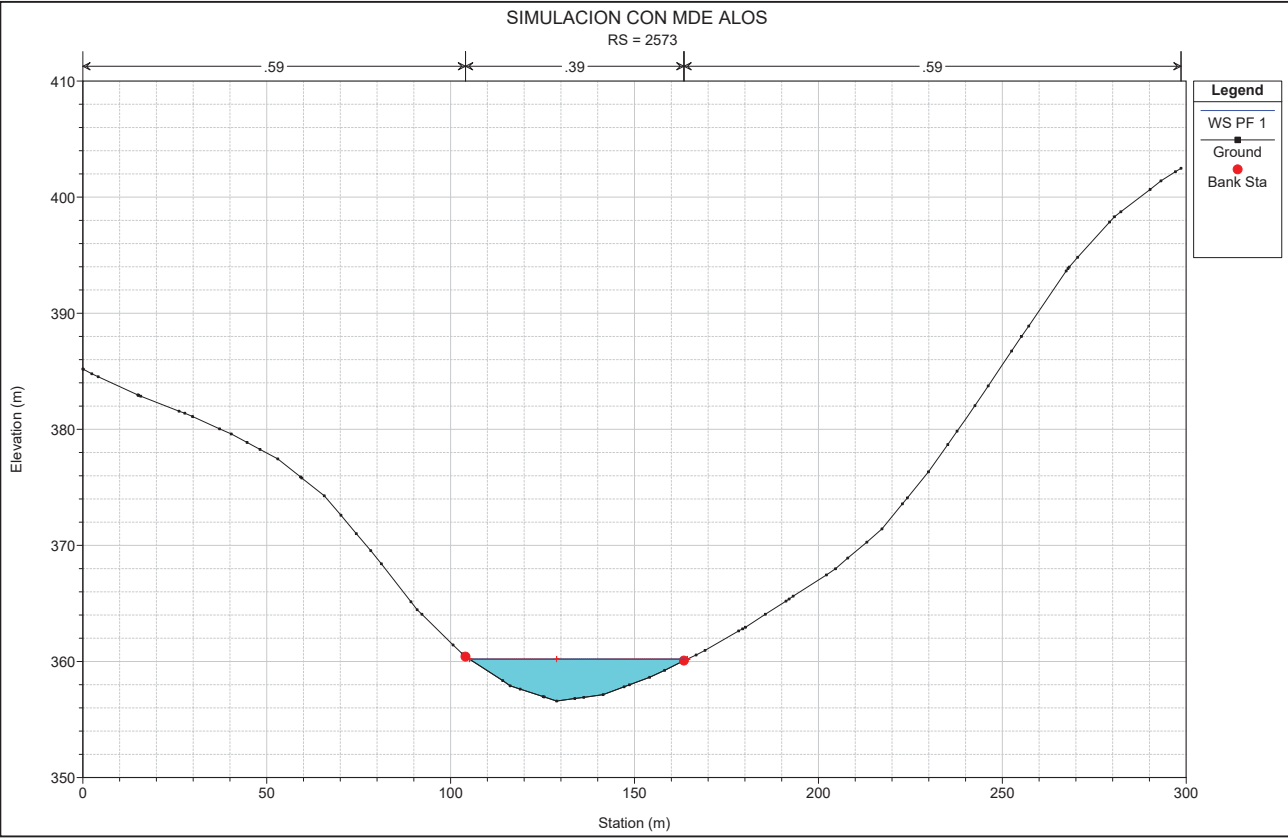
Perfiles transversales

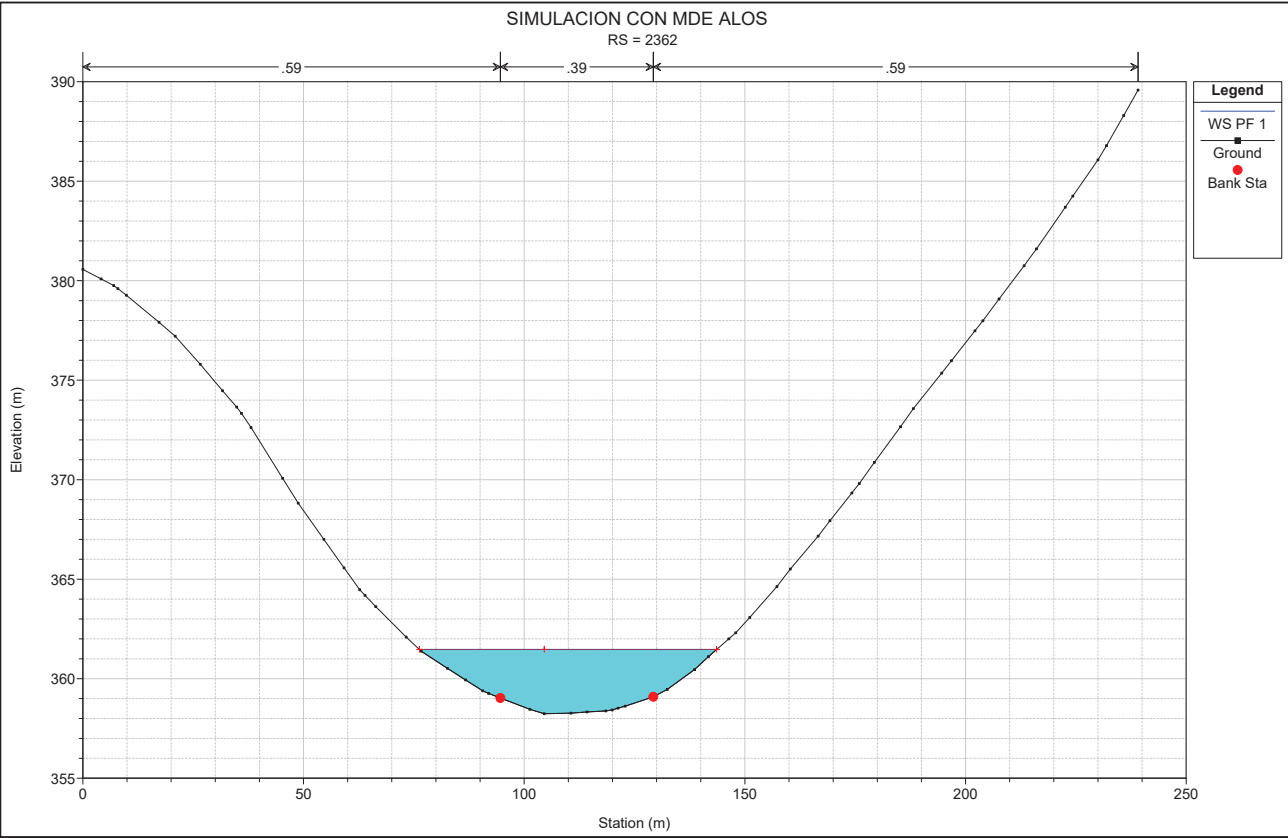
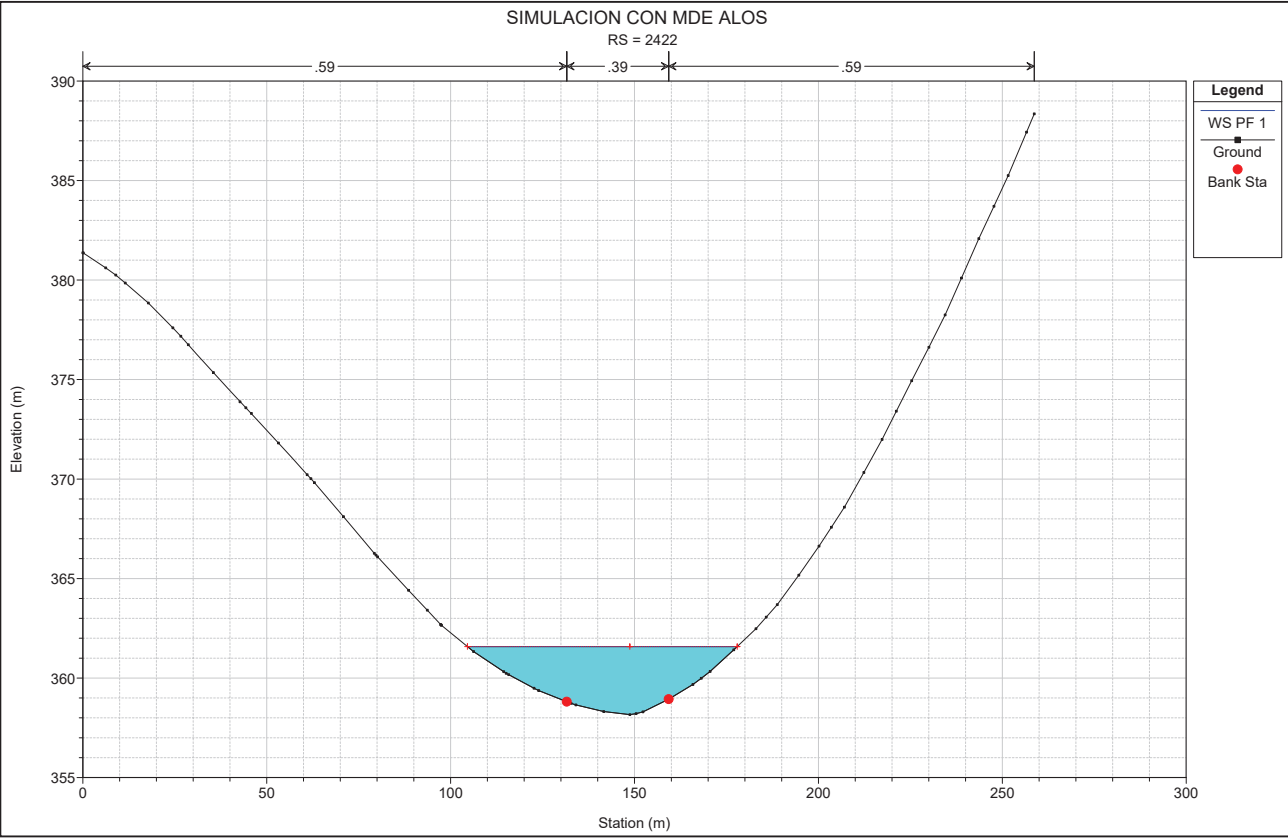
ALOS

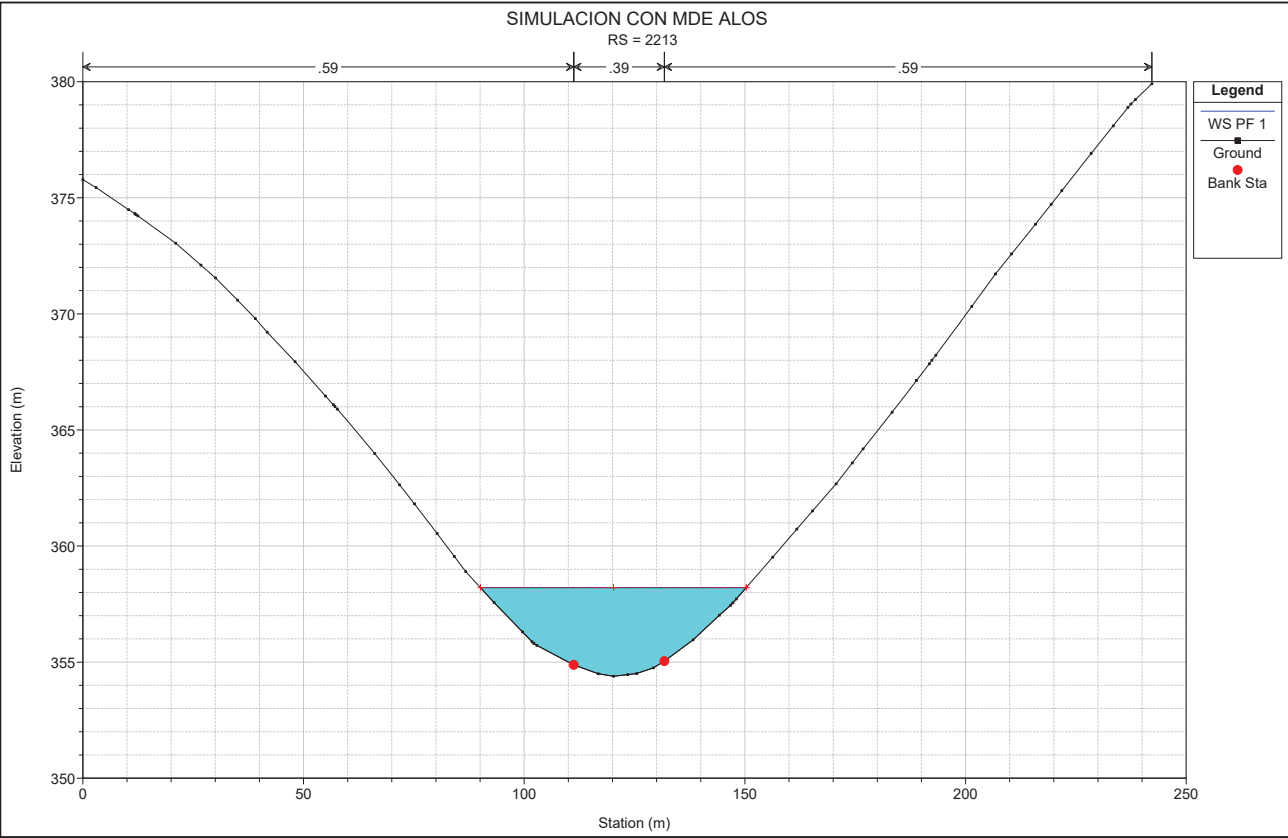
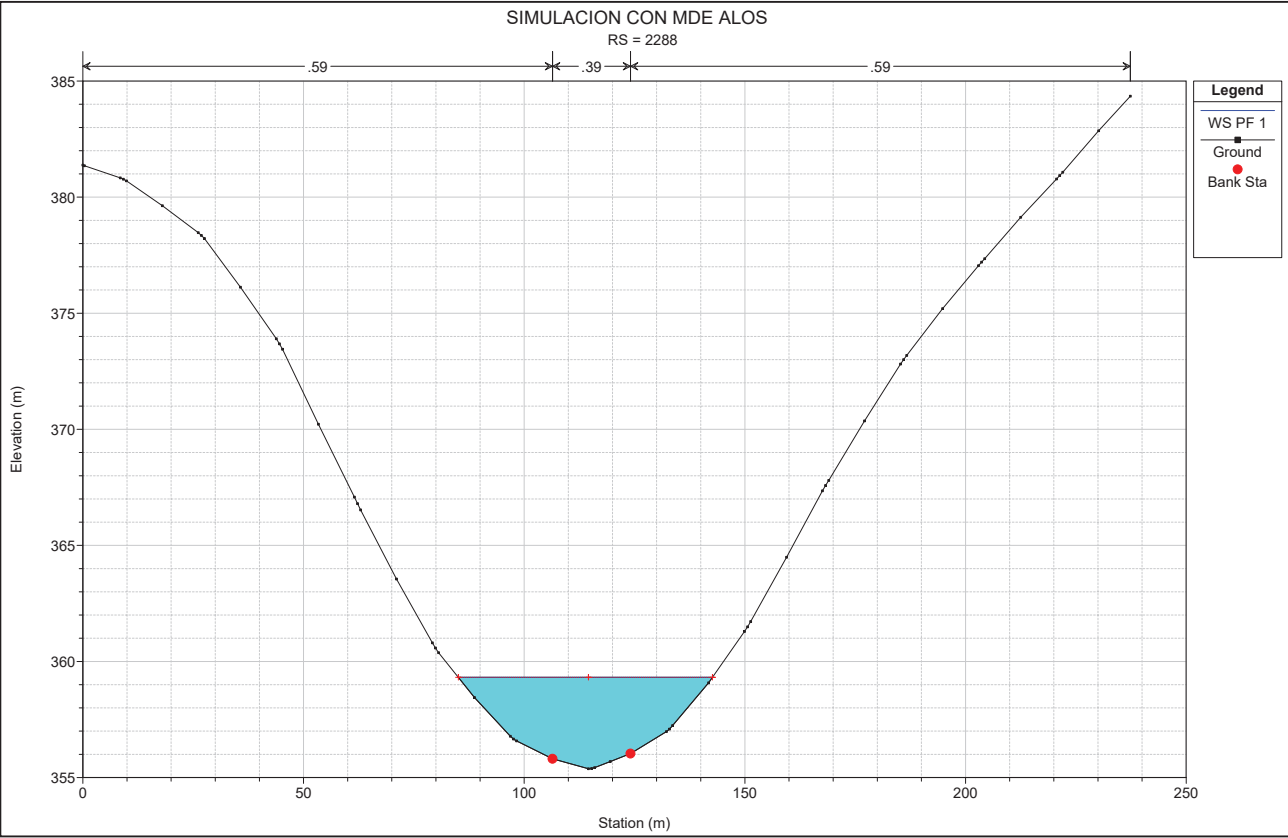


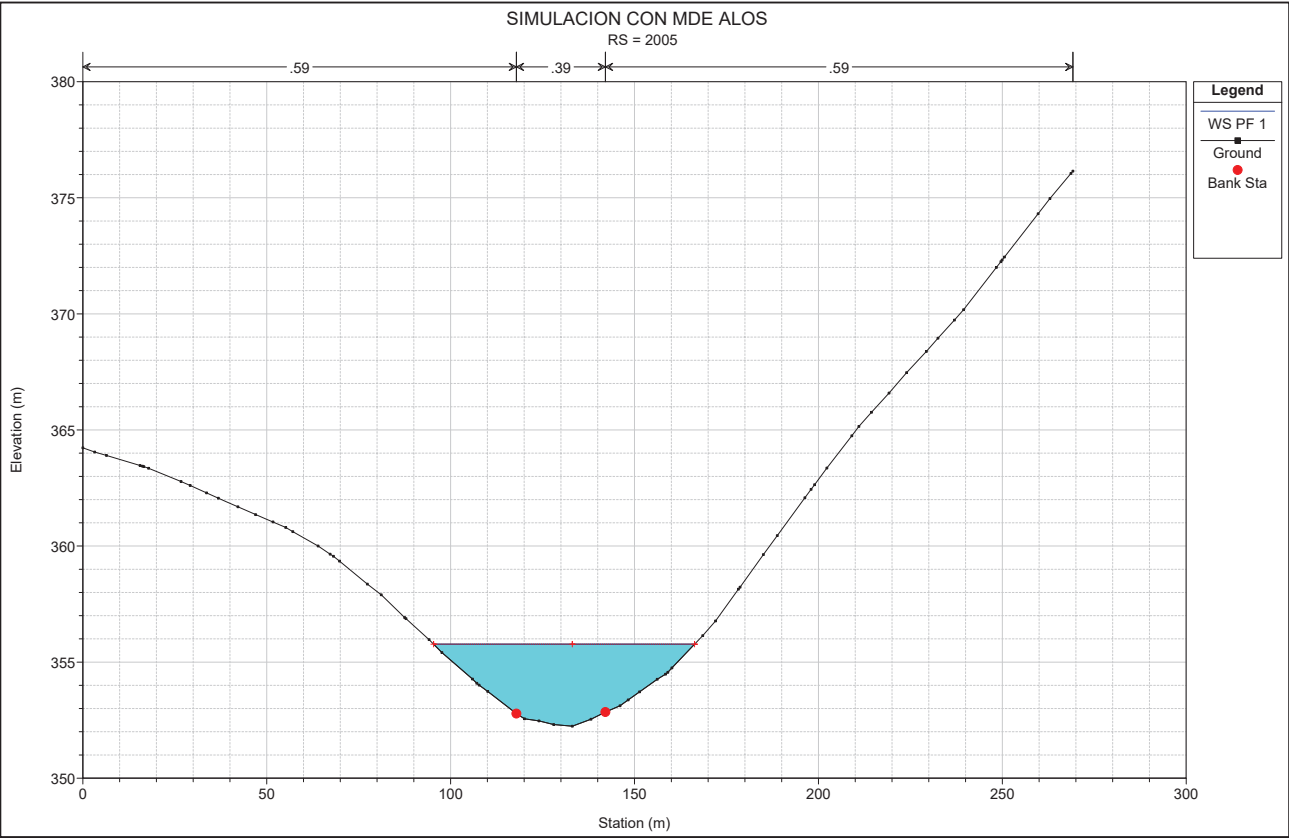
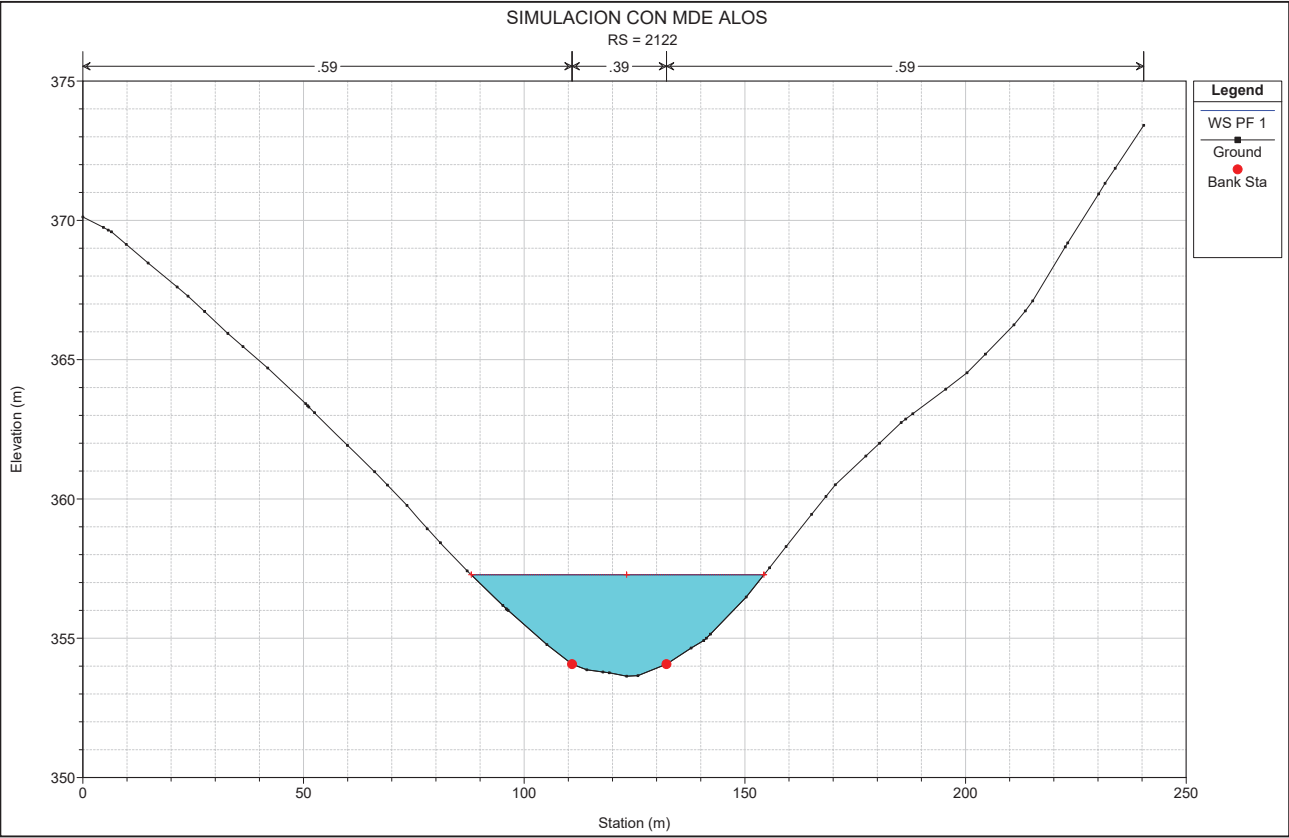


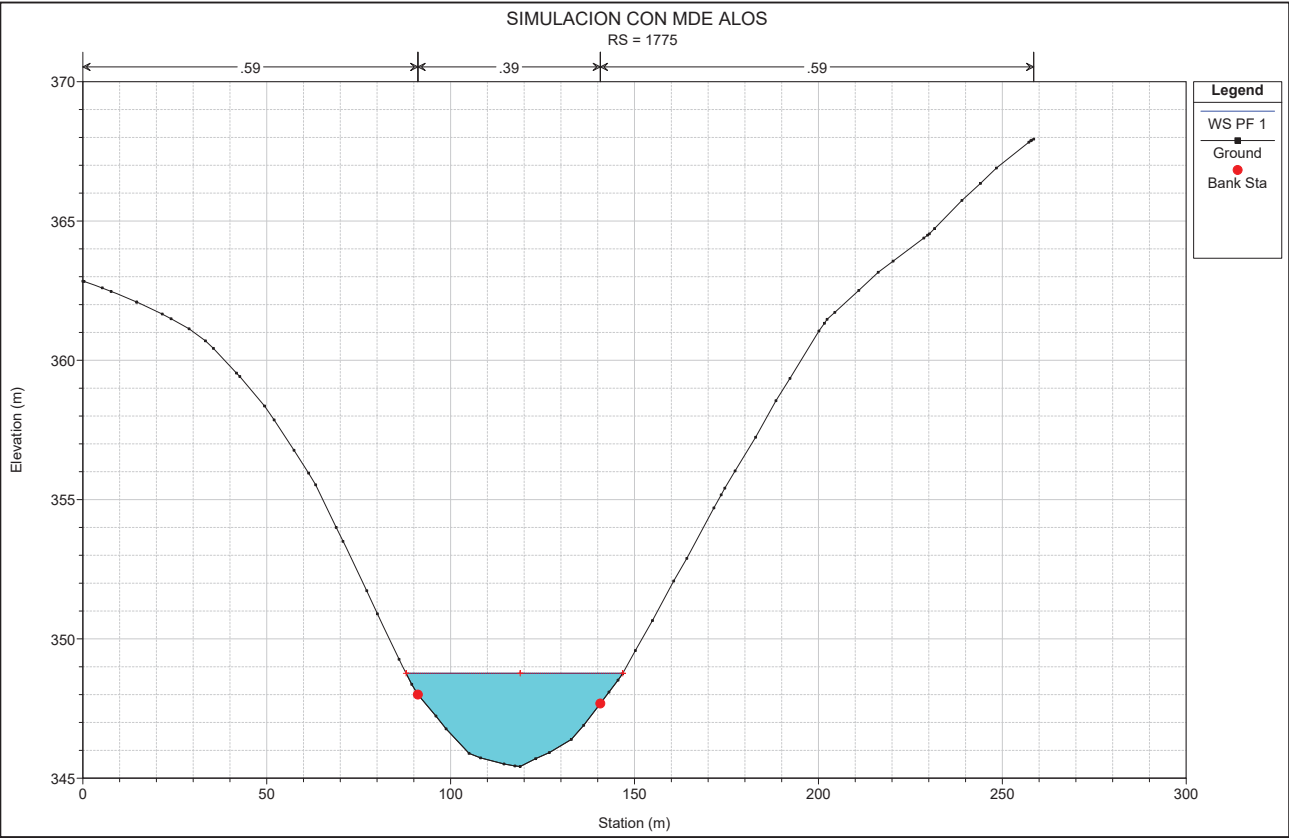
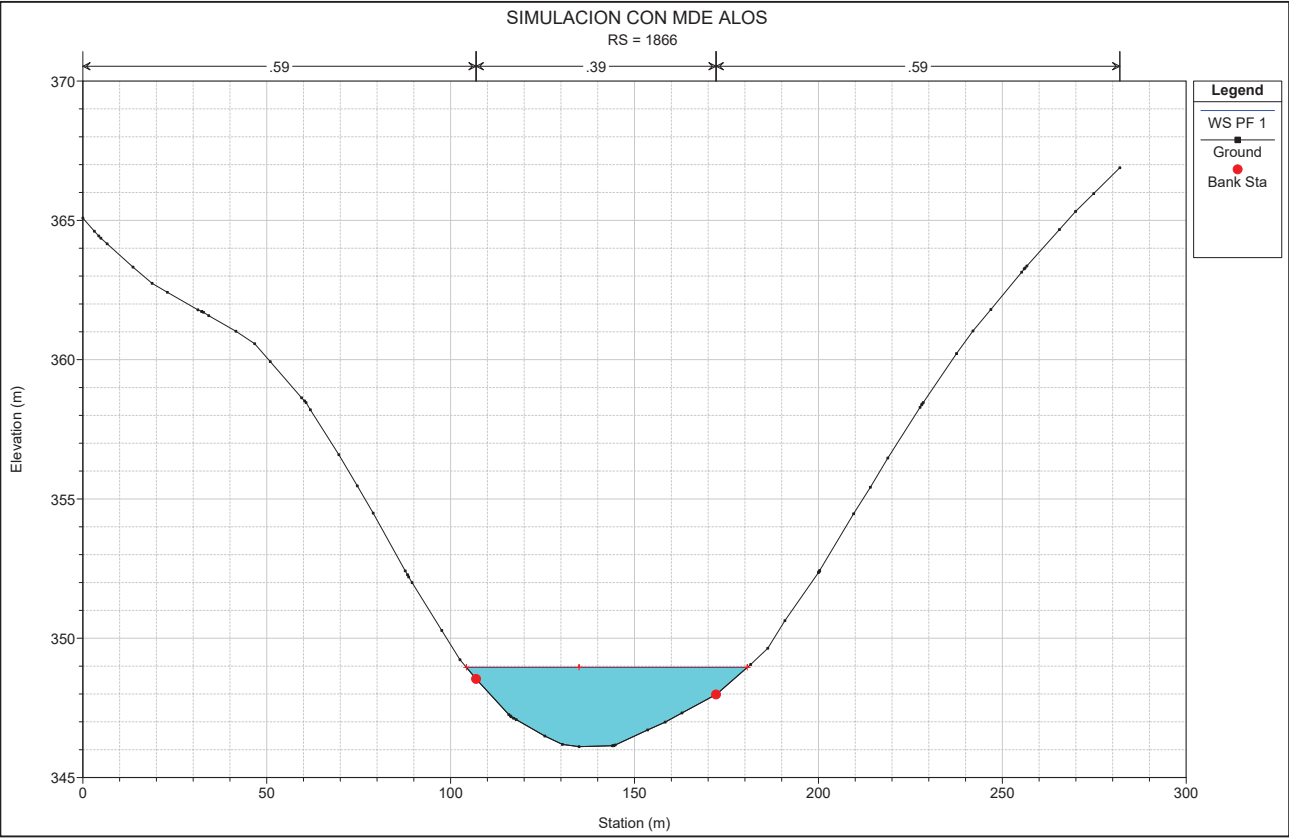


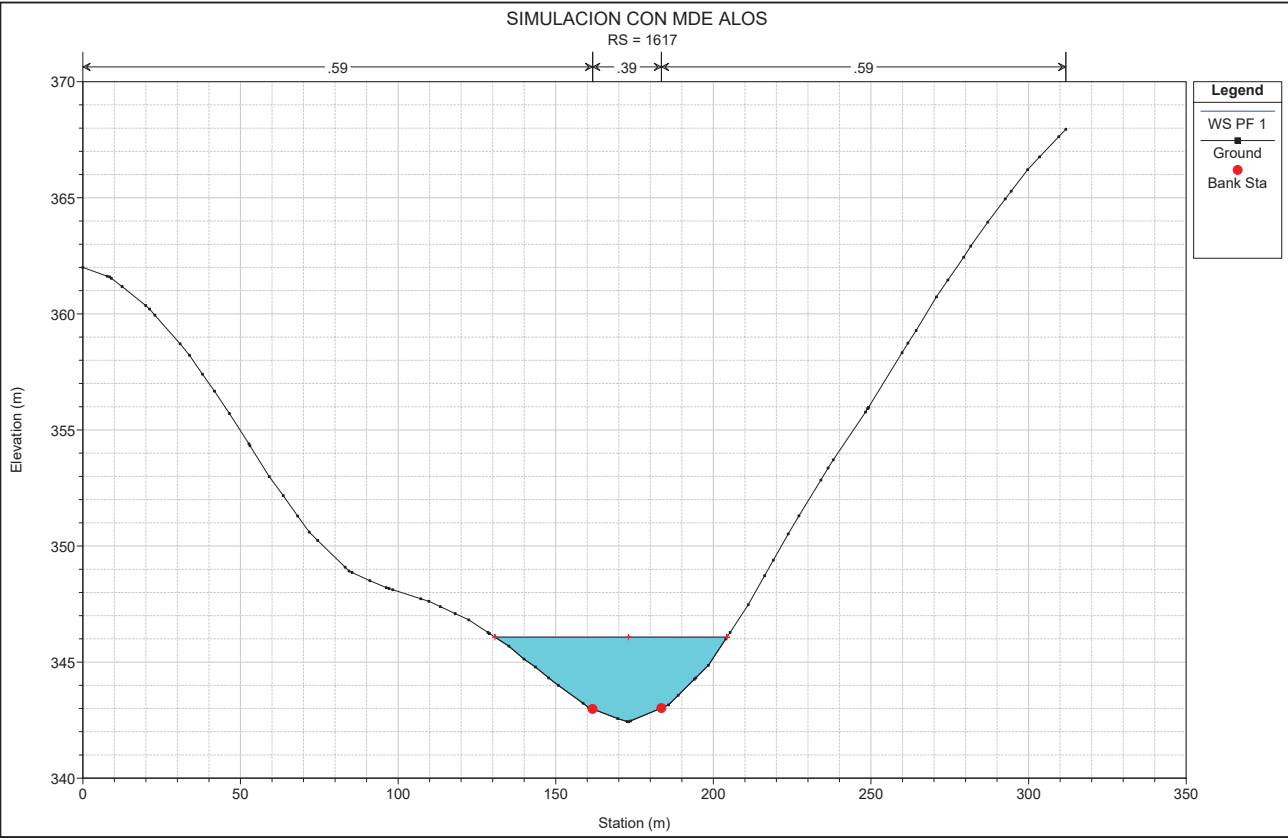
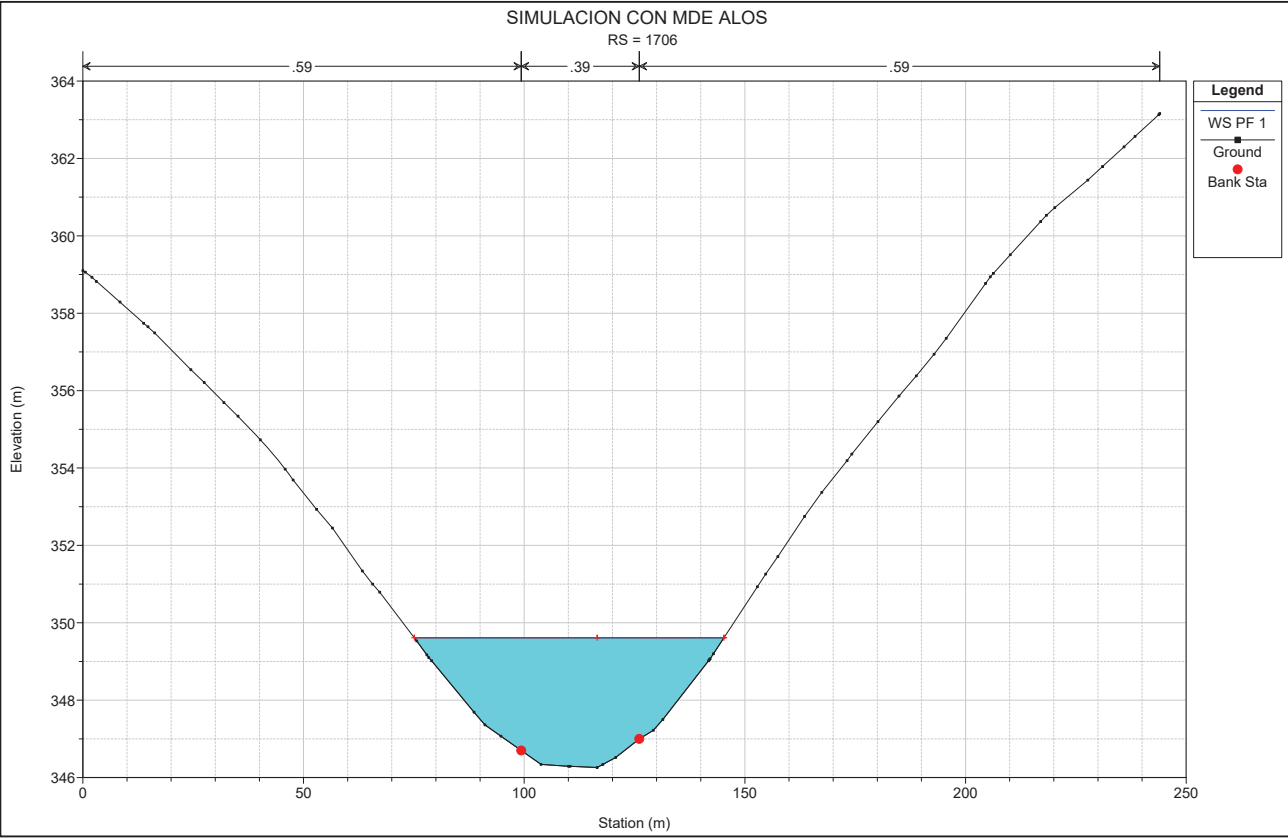


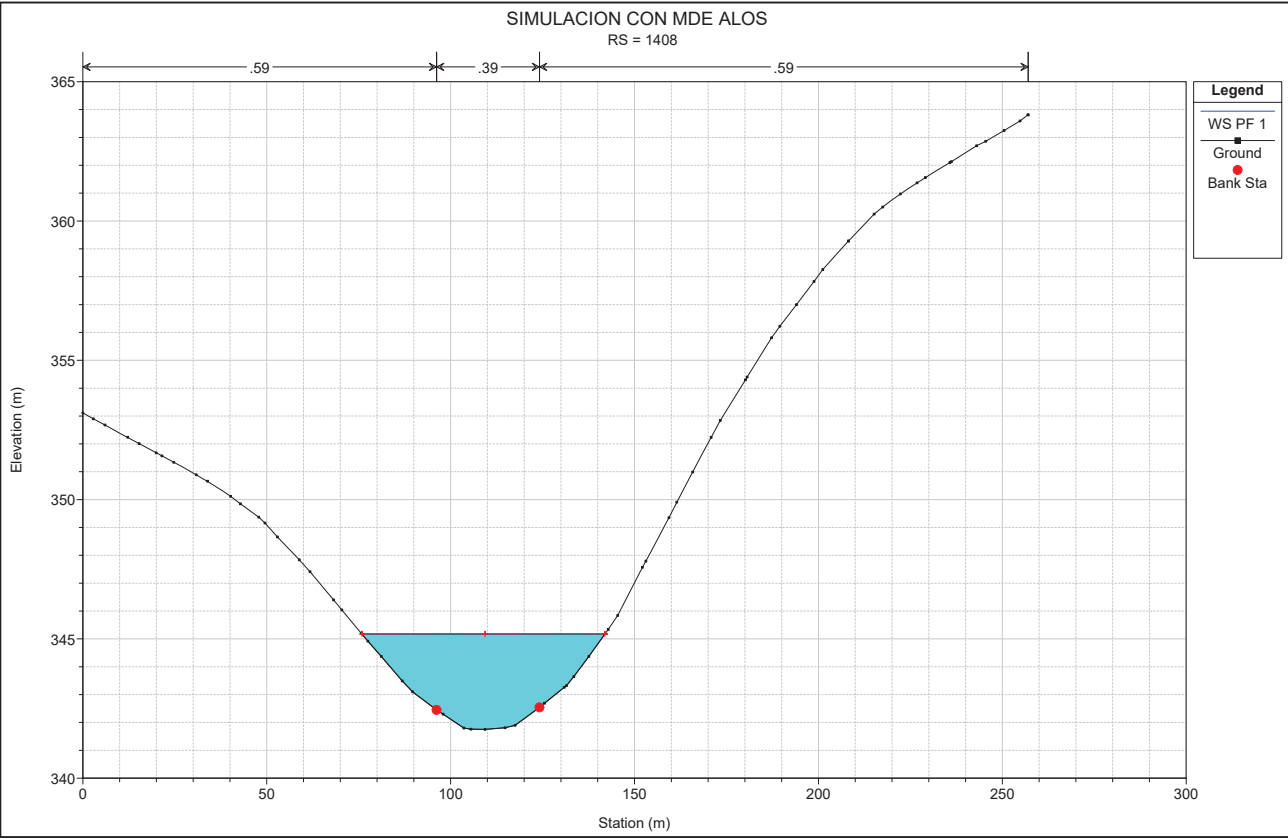
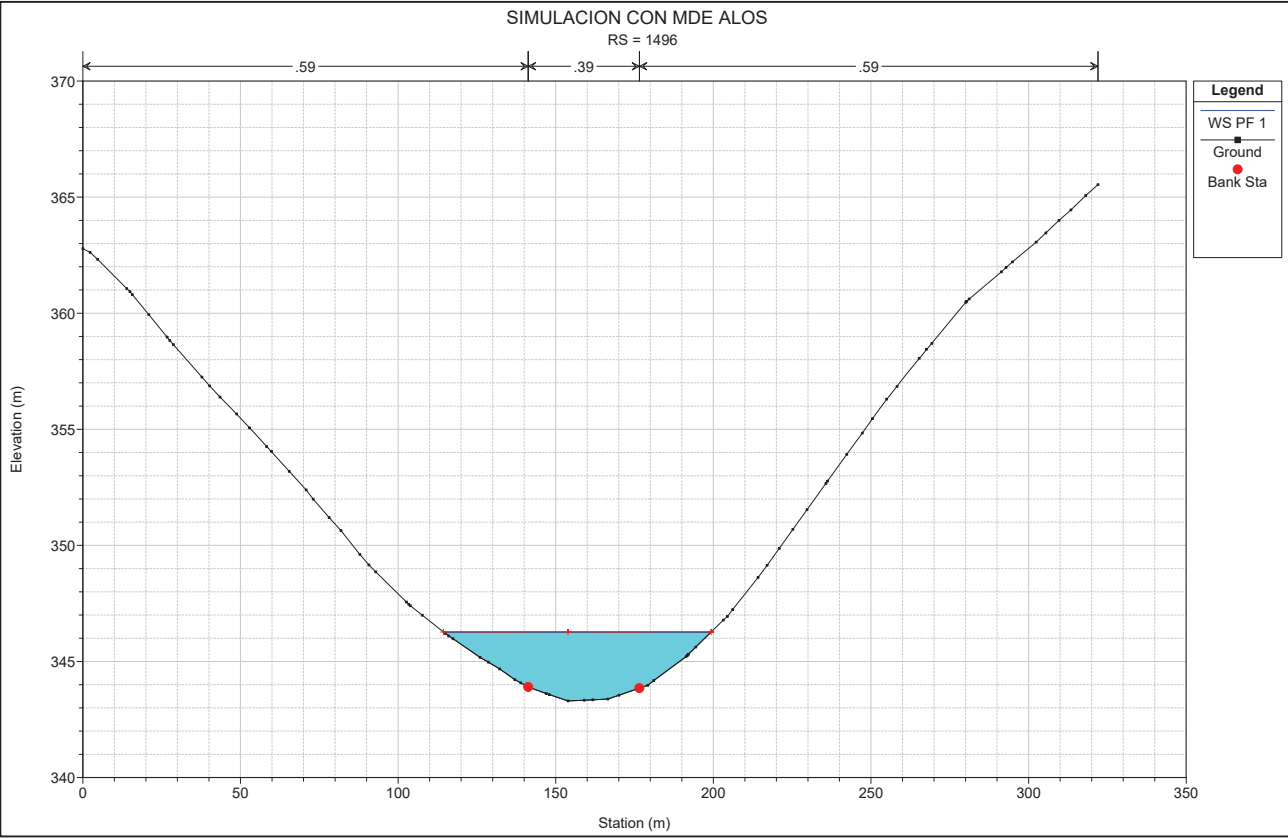


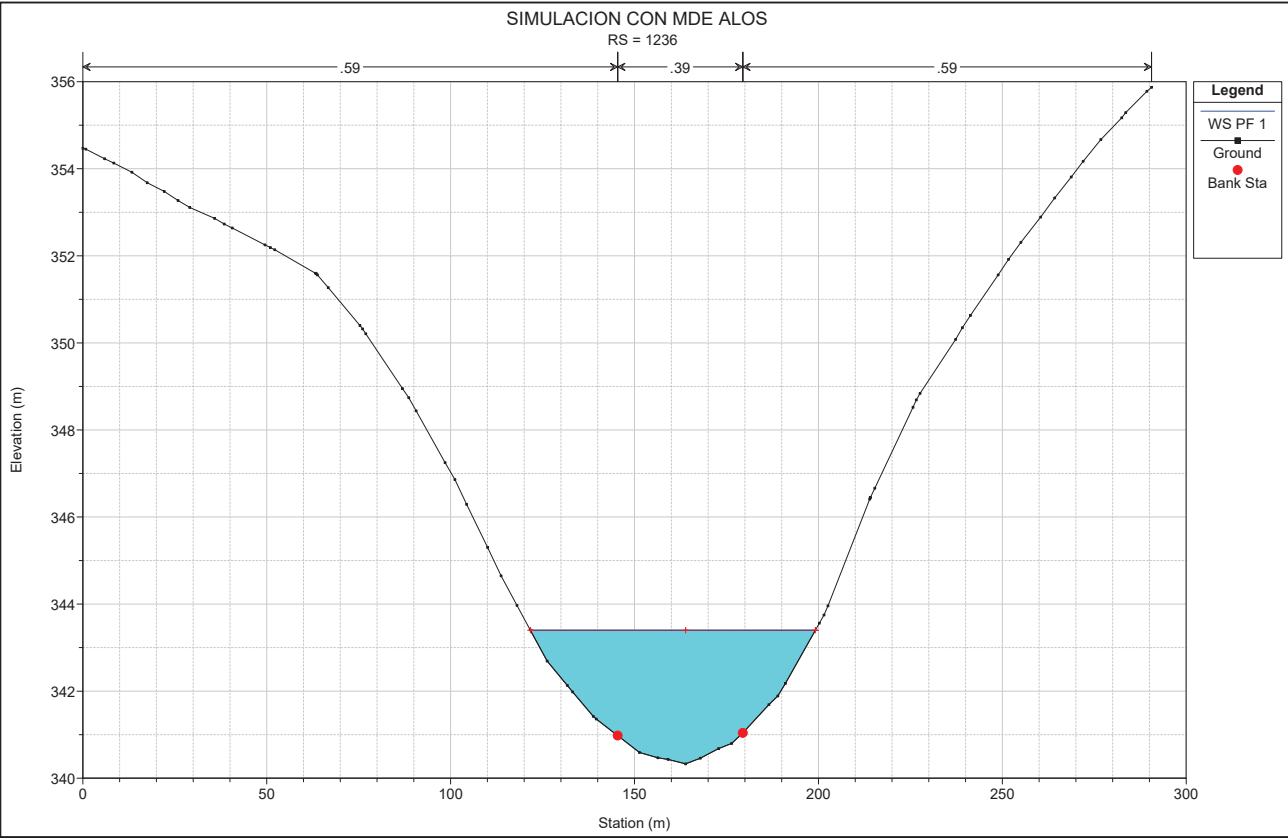
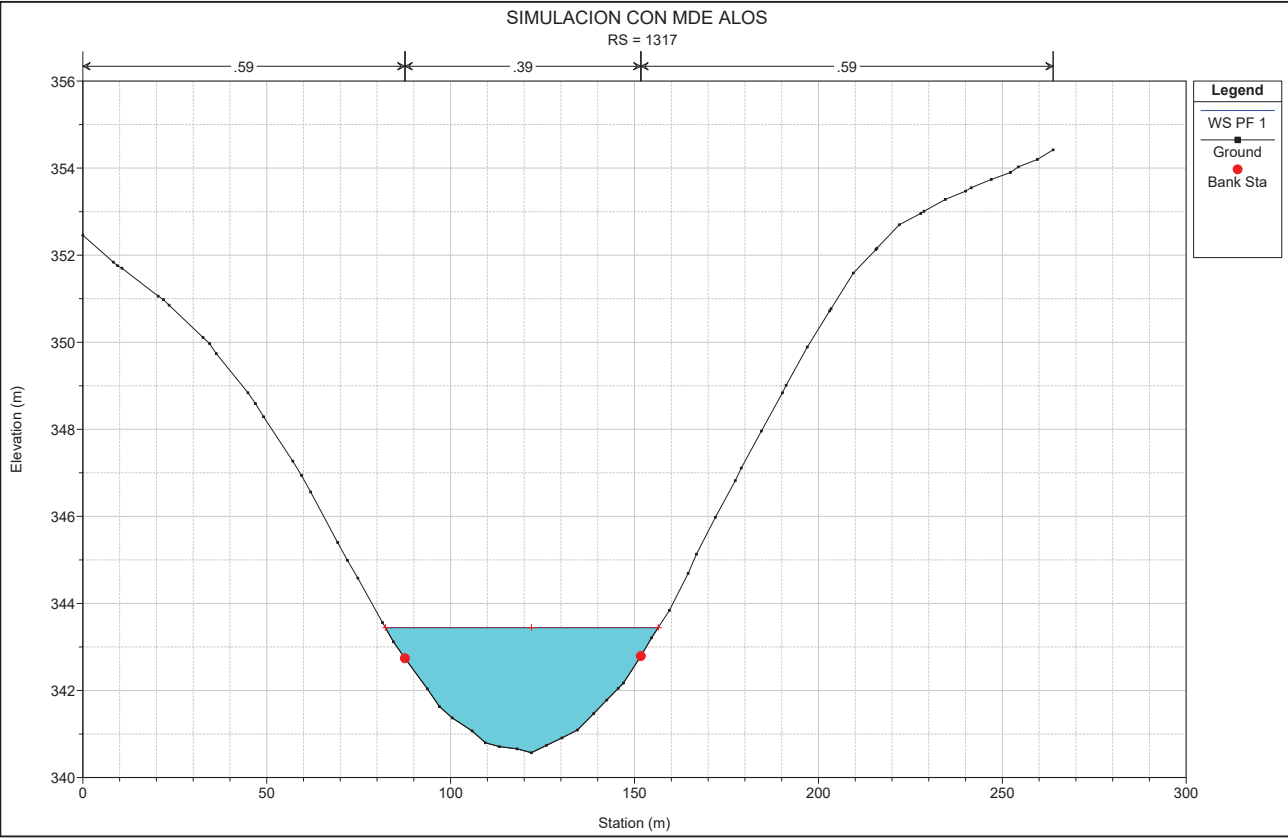


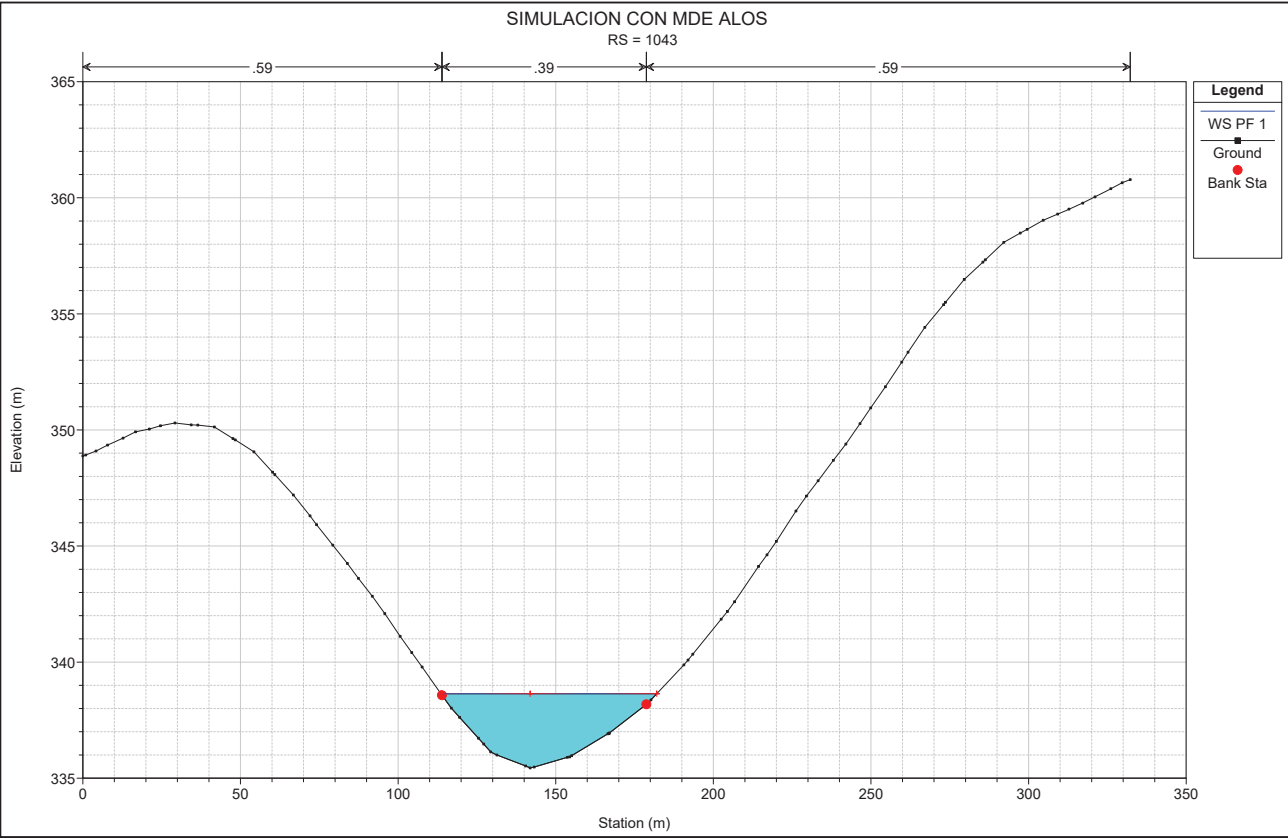
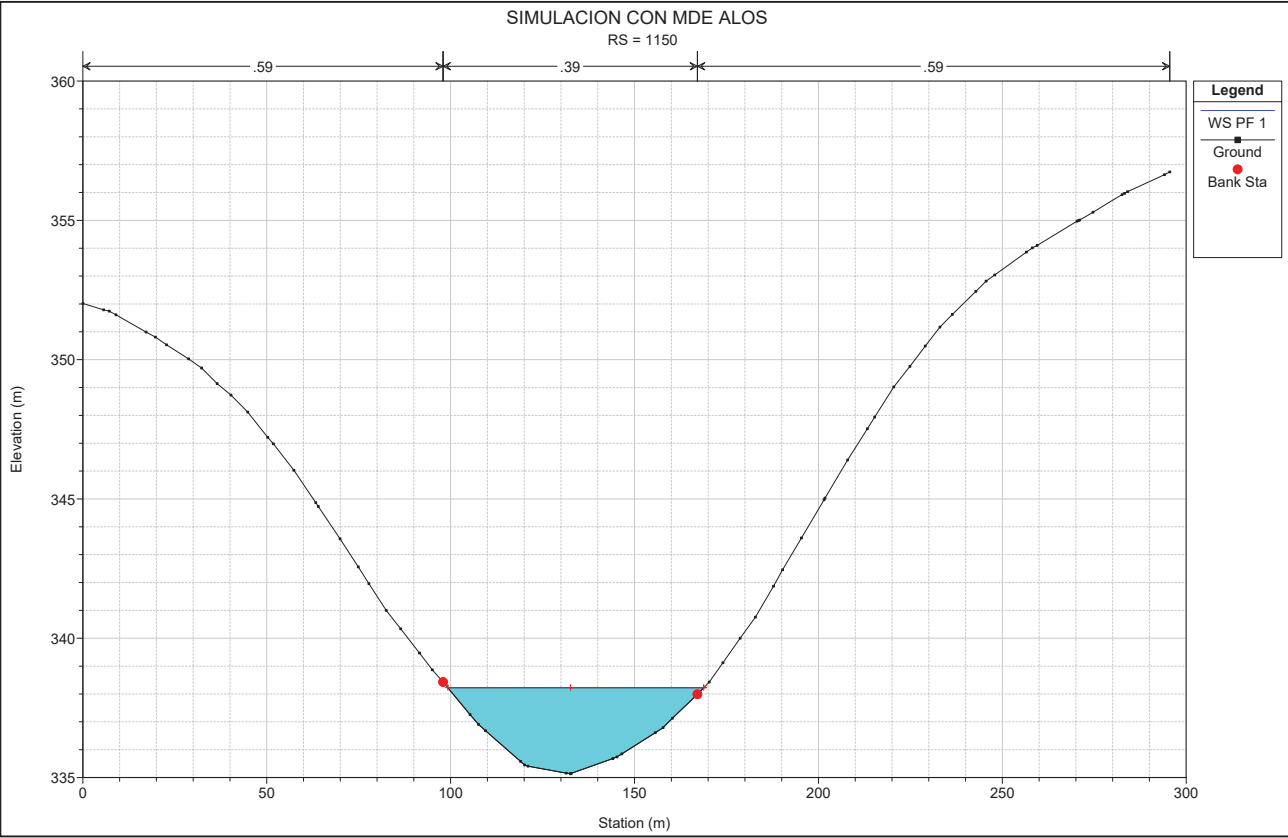


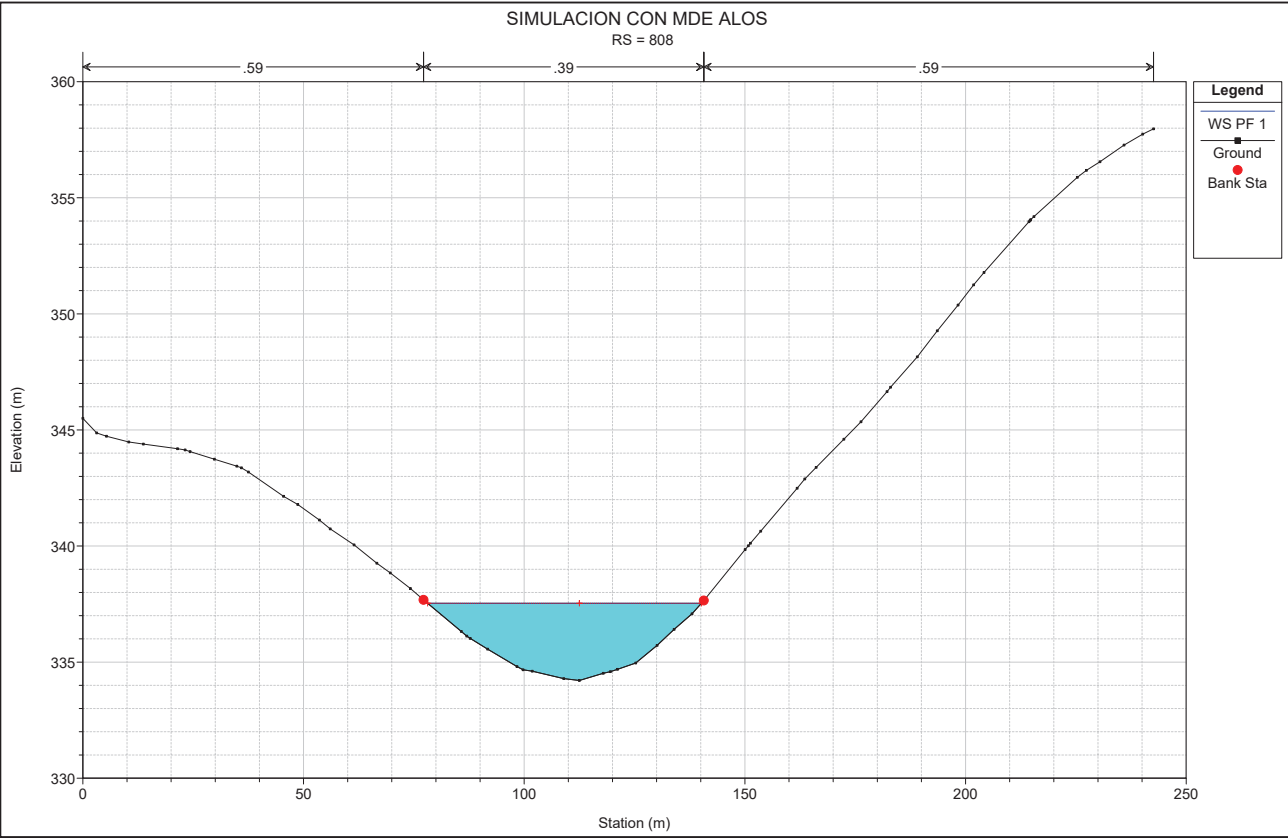
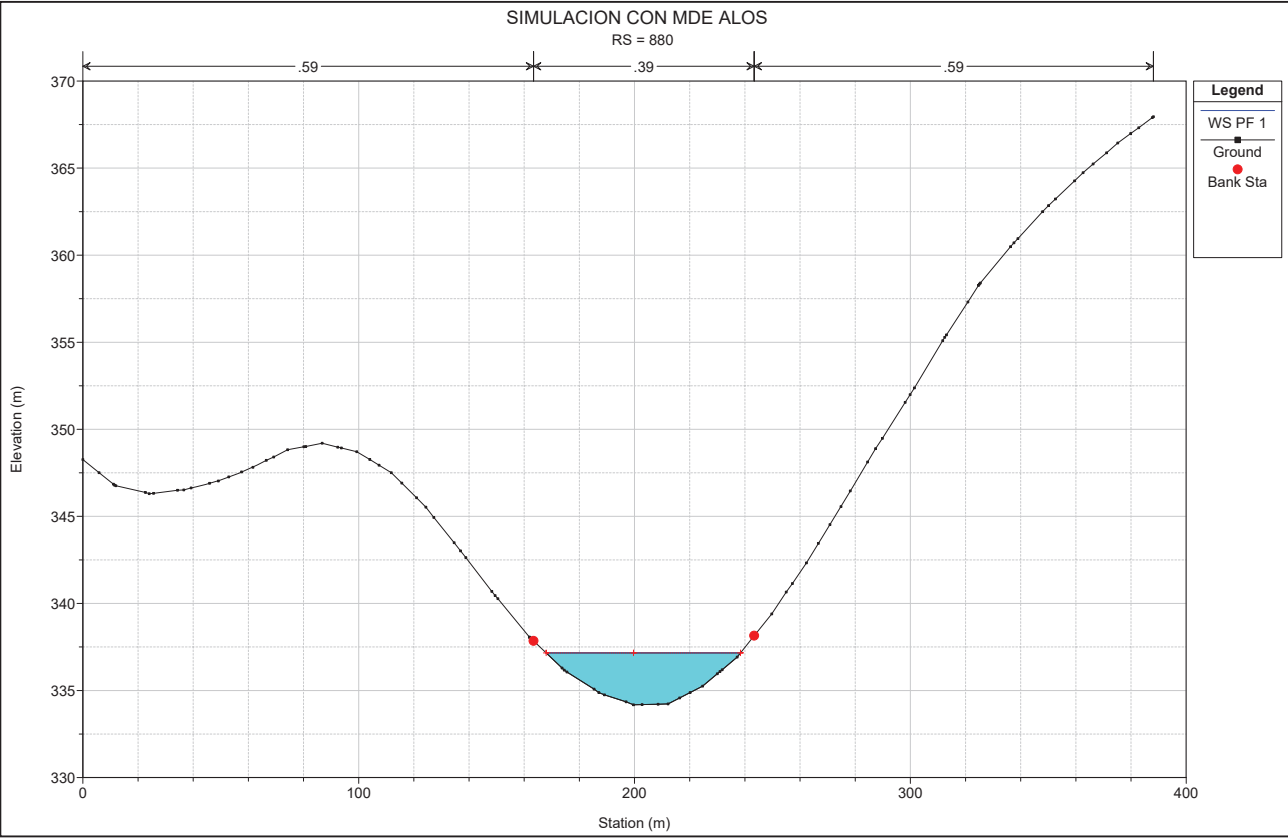


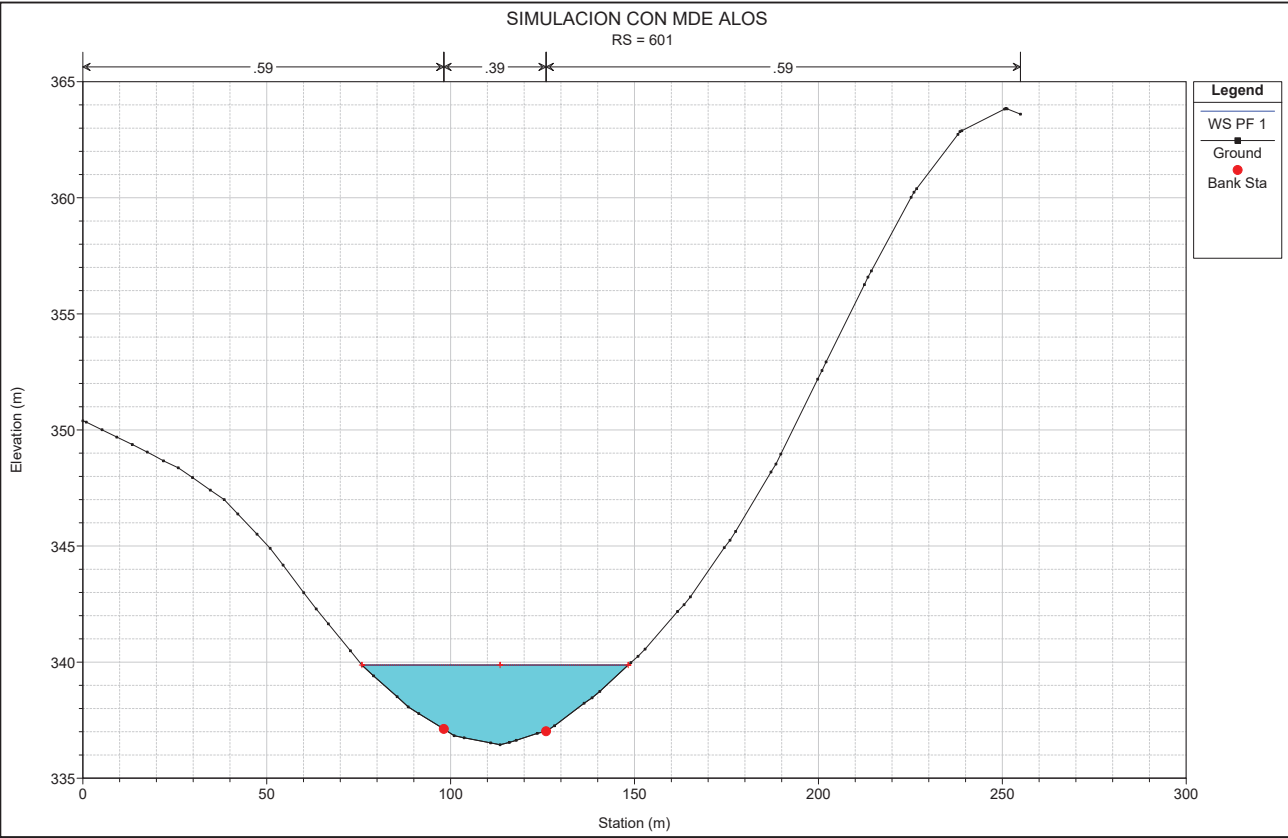
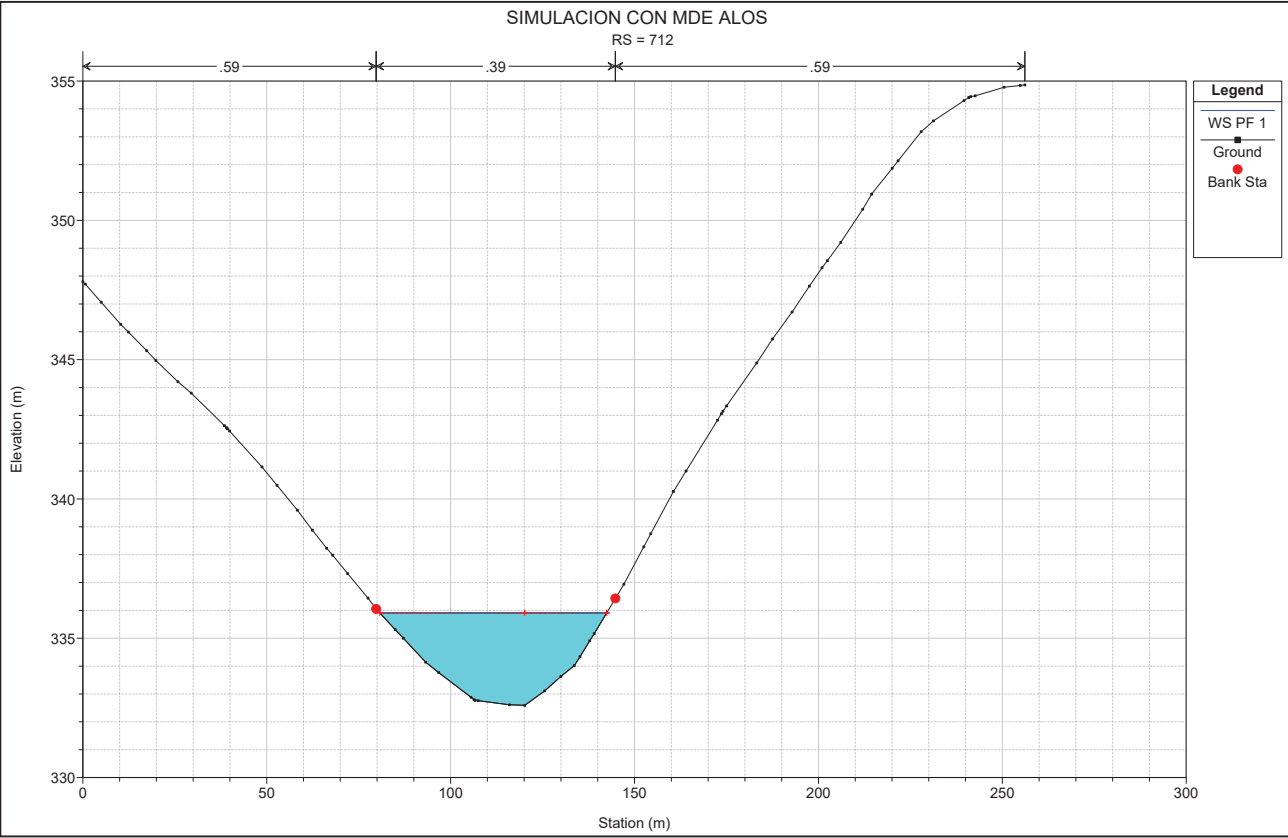


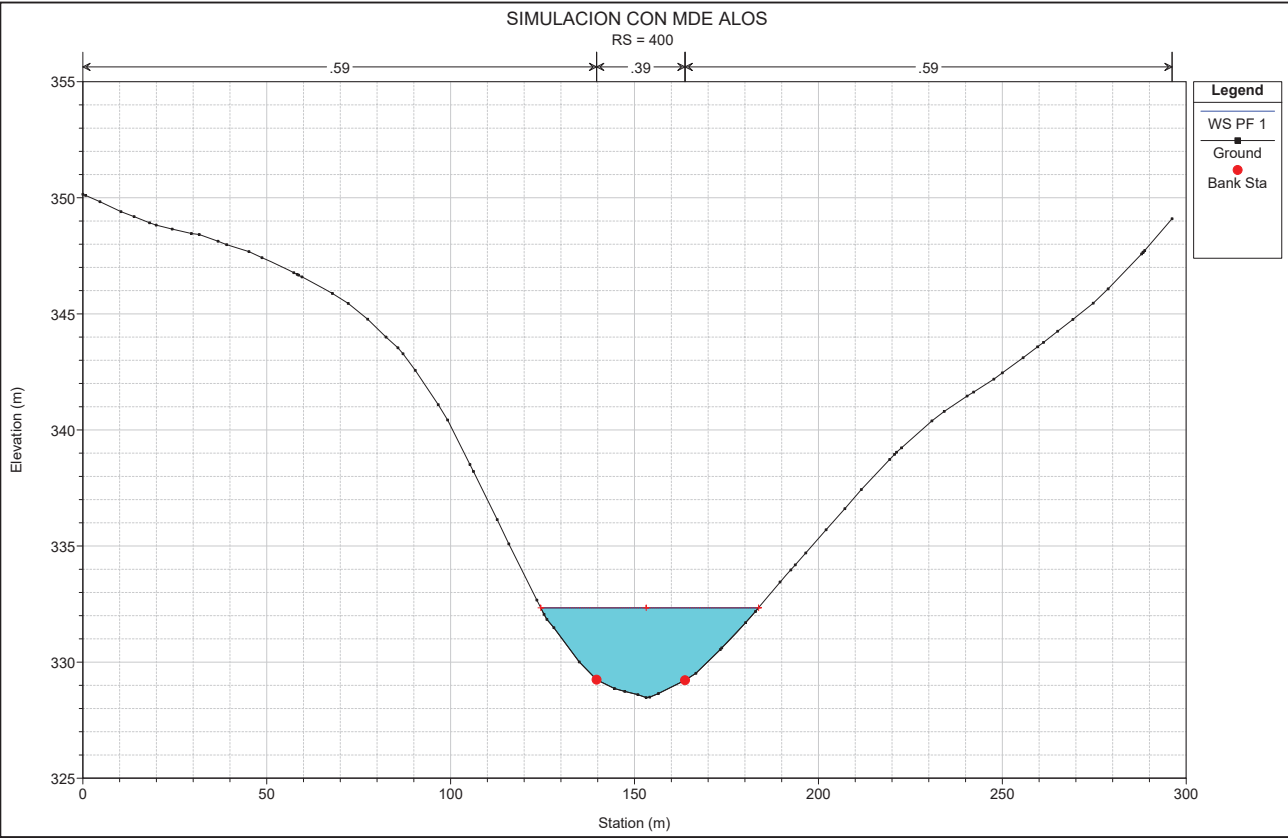
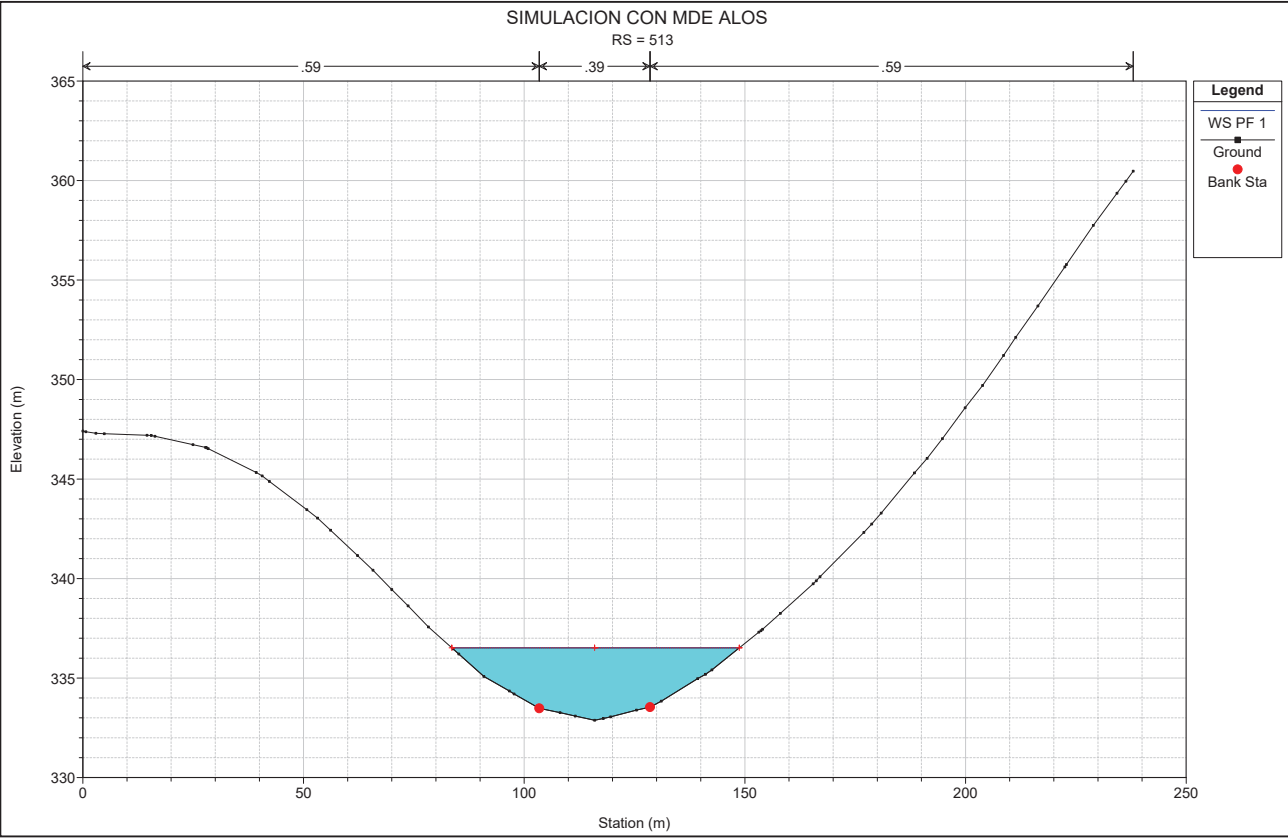


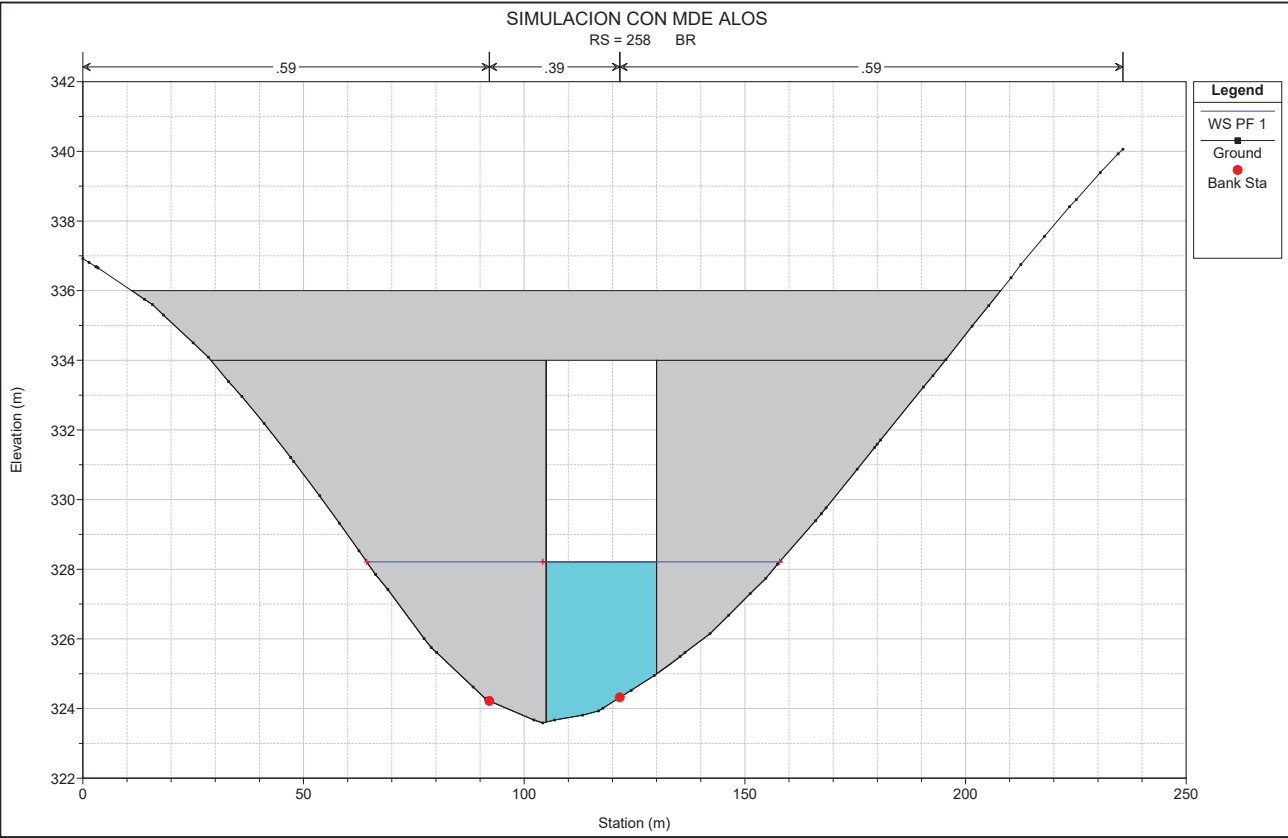
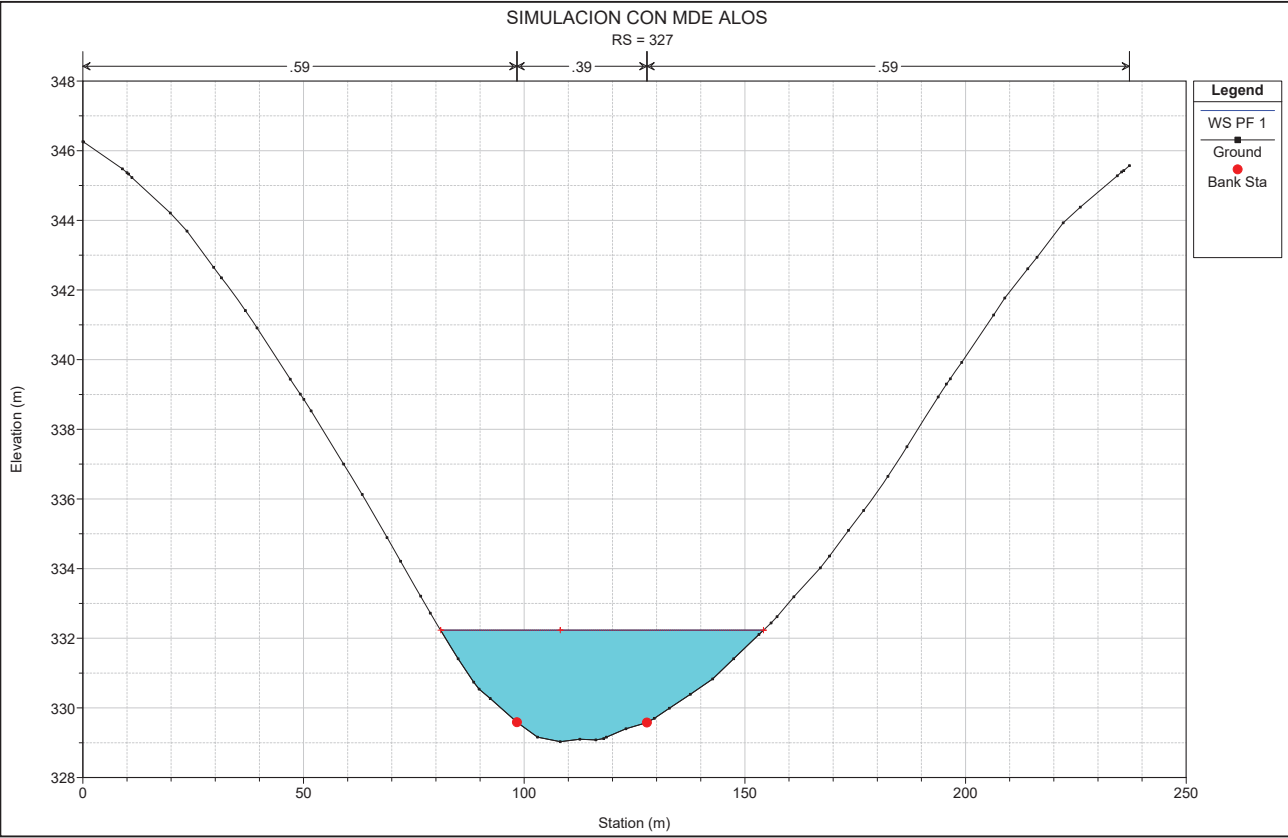


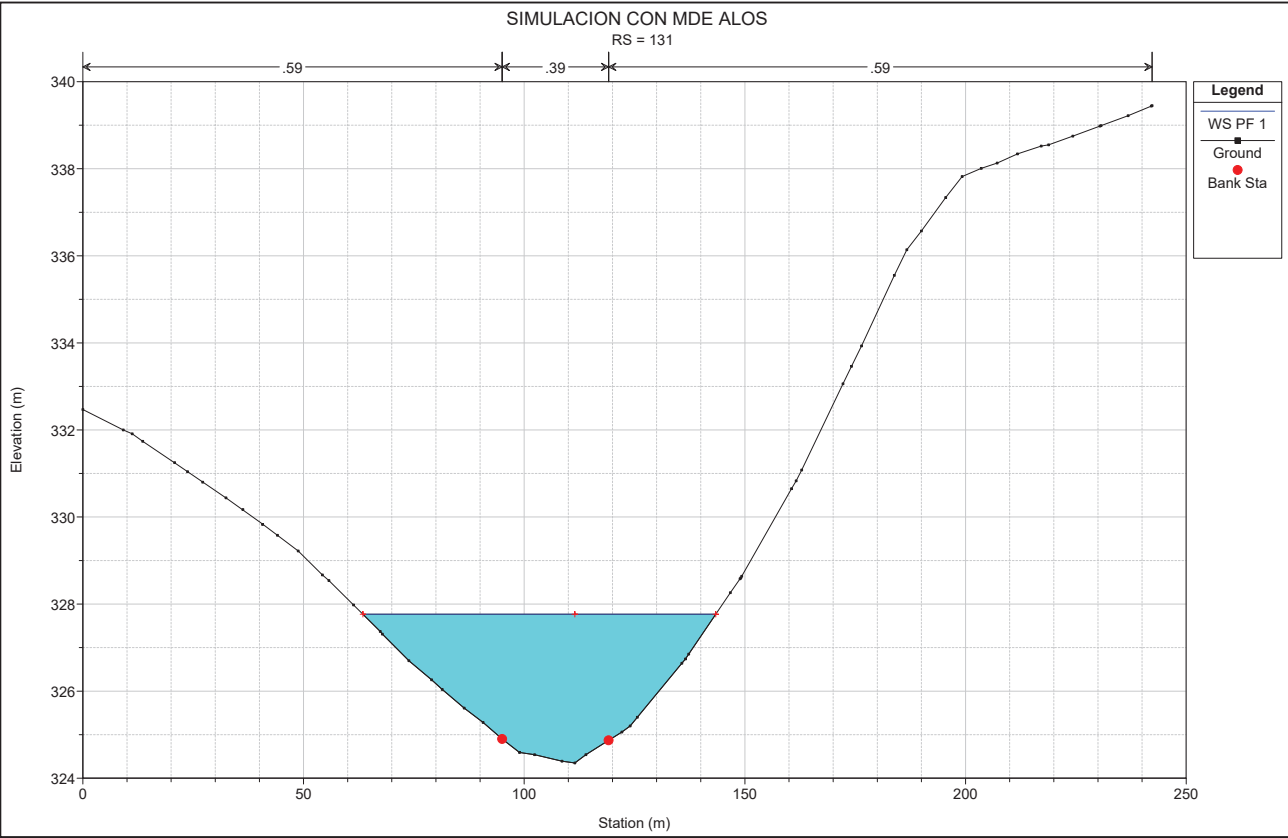
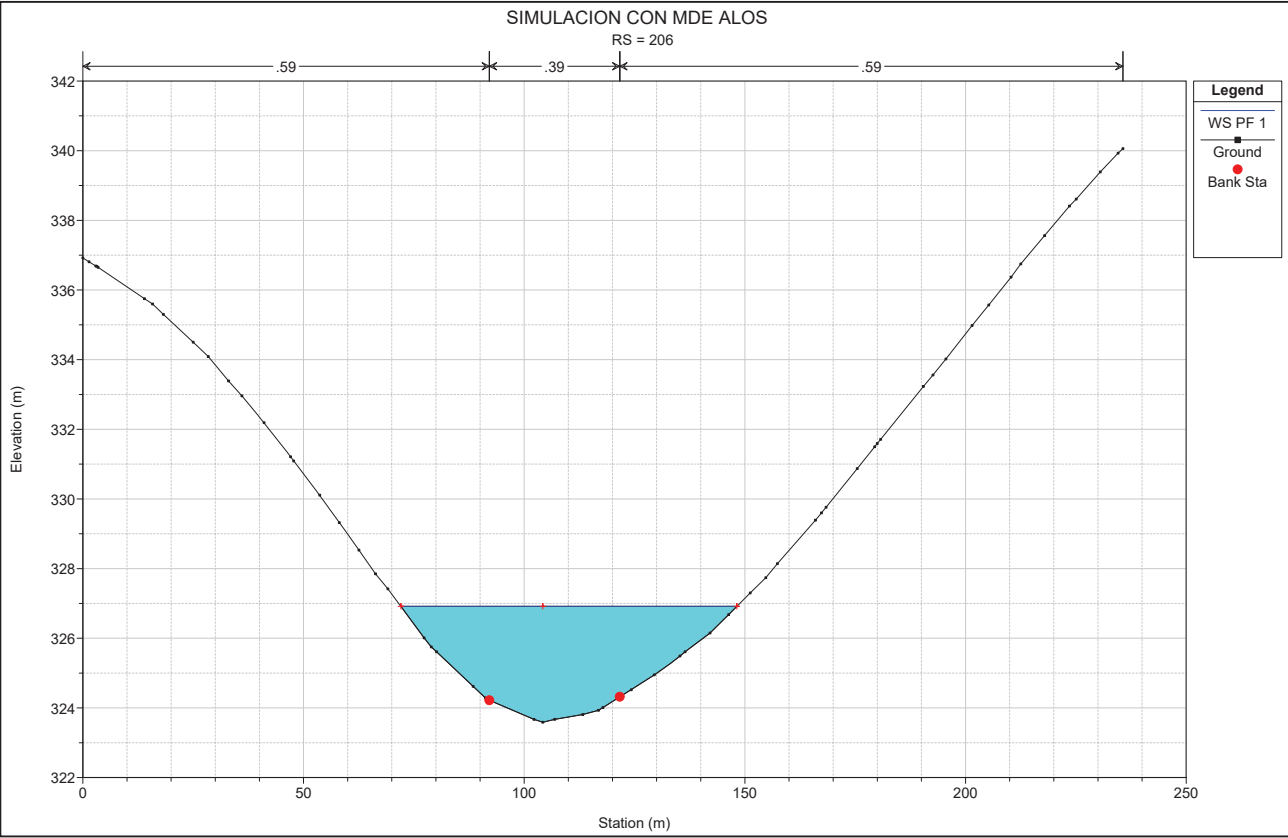


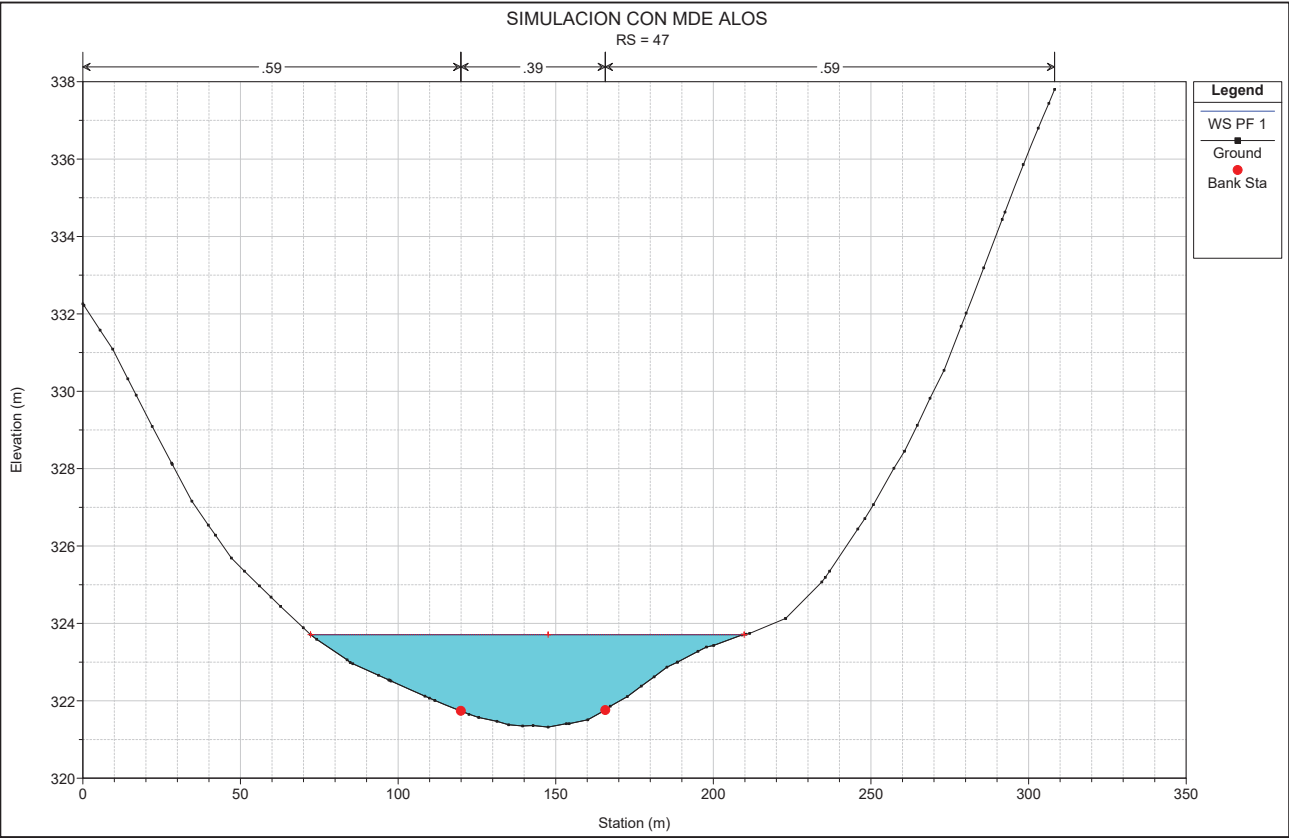
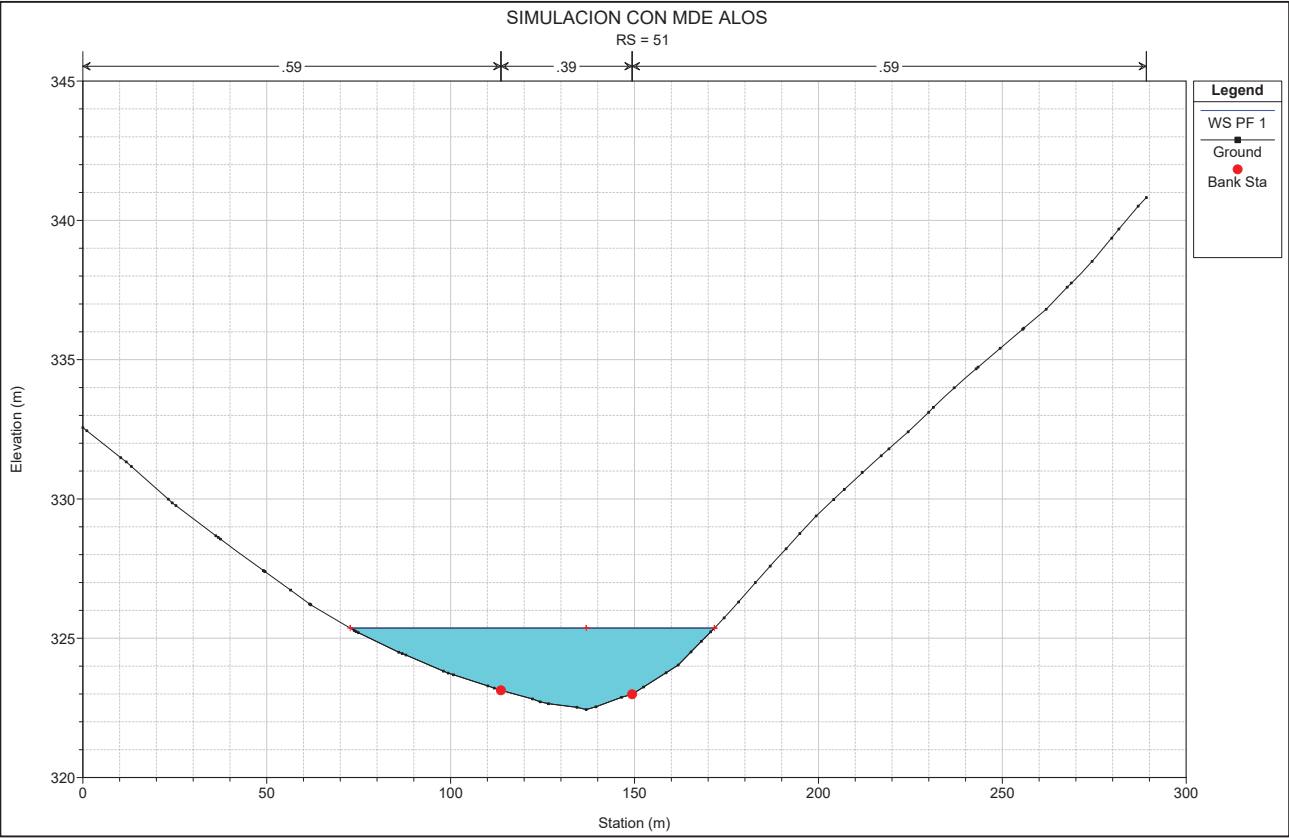












Perfiles transversales

SRTM

