



Universidad
Nacional
de Córdoba

Universidad Nacional de Córdoba

Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales

Maestría en Ciencias de la Ingeniería – Mención Recursos

Hídricos

TESIS DE MAESTRÍA

**Relevamientos topográficos 3D en laboratorio.
Técnica no intrusiva para la medición de la
evolución temporal de la morfología de un
cauce aluvial en un canal experimental**

por

Matías Bupo

Director: Mg. Ing. Juan F. Weber

Noviembre 2016

Resumen

Un aspecto importante de la modelación física en la hidráulica fluvial, es la medición de las geometrías resultantes de los procesos de erosión y sedimentación. Actualmente una de las técnicas más populares para realizar esta tarea, es la utilización de distanciómetros laser, los cuales tienen una precisión de ± 1 mm. Como alternativa se presenta el desarrollo de una novedosa técnica para realizar relevamientos 3D con un sensor de movimiento en canales de laboratorio. El sensor de movimiento utilizado fue la XtionPro Live de ASUS, dispositivo diseñado originalmente para video juegos. Cuando el equipo se ubica a 60 cm aproximadamente del mensurando, la resolución espacial y de profundidad es de ~ 1 mm, y la velocidad de captura del equipo es de hasta 30 cuadros por segundo (fps).

En el marco de este estudio, se determinó que estos sensores son capaces de realizar mediciones a través del agua, con la resolución y velocidad de captura ya mencionados, y los mismos estándares de calidad en la información.

El objetivo principal de este trabajo es mostrar el desarrollo de dos novedosas técnicas que permiten generar modelos digitales de elevación (MDE) del terreno en micro topografías de laboratorio. La primera técnica propuesta presenta un alto rendimiento respecto de las metodologías tradicionales, ya que el volumen de información obtenida es sustancialmente mayor, el tiempo que demanda la tarea es menor y la precisión de los resultados es la misma. Este procedimiento permite realizar relevamientos de calidad en superficies mayores a las de la propia captura del sensor, a través de un proceso de concatenación. Se relevó una superficie de 1.20 x 3.50 m y se obtuvo un MDE con más de 4.200.000 puntos.

La segunda técnica consiste en la aplicación de estos sensores para realizar relevamientos topográficos a tiempo real (en vista de la capacidad medir a través del agua.) La aplicación de esta técnica permite obtener MDE de un sector del canal con una frecuencia de hasta 30 Hz y más de 76000 puntos. Lo novedoso de esta técnica es que los relevamientos no son intrusivos, y que la calidad de los resultados es similar a la obtenida cuando se miden superficies que no se encuentran sumergidas. La implementación de estas técnicas permiten la generación de modelos digitales del terreno a un muy bajo costo los cuales son de gran utilidad en la hidráulica fluvial, ya que se pueden realizar diversos análisis sobre los mismos.

Se ilustrará el procedimiento para la utilización de estos equipos en relevamiento de laboratorios, particularmente aplicados a canales compuestos con material aluvial, sometidos a procesos de erosión.

Abstract

An important aspect of physical modeling in fluvial hydraulics, is measuring geometries resulting from the processes of erosion and sedimentation. Currently one of the most popular techniques to do this, is the use of laser distance meters, which have an accuracy of ± 1 mm. Alternatively the development of a novel technique for 3D surveys with a motion sensor in flumes is presented. The motion sensor used was XtionPro Live ASUS device originally designed for video games. When the equipment is located 60 cm from the measurand, spatial and depth resolution is ~ 1 mm, and a capture rate is up to 30 frames per second (fps).

As part of this study, it was determined that these sensors are able to perform measurements through the water, with the resolution and capture rate already mentioned, and the same standards of quality information.

The main objective of this work is the development of two novel techniques to generate digital elevation models (DEM) in laboratory topographies. The first technique has a high performance compared to traditional methods, because the volume of information obtained is substantially greater, the time demand the task is less and the accuracy of the results is the same. The procedure allows make surveys of greater surfaces to the sensor itself can capture, through a concatenation process, an area of 1.20 x 3.50 m was topographically surveyed and a 4,200,000 points DEM was obtained.

The second technique involves the application of these sensors for topographic real-time surveys (in view of the capacity measured through water). The application of this technique allows obtaining DEM of a sector of the channel with a frequency up to 30 Hz and more than 76000 points. The novelty of this technique is that the surveys are not intrusive and that the quality of the results is similar to that obtained when surfaces measured are not submerged. The implementation of these techniques enable the generation of digital terrain models at a very low cost which are useful in the river hydraulics, and it is possible perform various analyses on them.

The procedure for the use this equipment in laboratories surveys, will be illustrated, particularly applied to channels with alluvial material under erosion processes.

Agradecimientos

El autor desea agradecer a las siguientes personas, ya que gracias a la colaboración de todos y cada uno de ellos fue posible la culminación de este trabajo:

- A mi familia y en particular a mi esposa Lucrecia, ya que sin su apoyo esto hubiera sido imposible.
- A quien con tanta paciencia y dedicación dirigió este trabajo, Juan Weber.
- Al Laboratorio de Hidráulica, que fue el lugar de trabajo donde se desarrolló esta tesis.
- A los becarios que colaboraron en las tareas experimentales, Andrés Cabello, Marcos Verón y a Federico Fada Py.
- A Kenneth D. Mankoff, quien me brindó una importante ayuda allá por los comienzos.
- MOMMA Eiichiro, por su importante colaboración

Y a la Secretaría de Ciencia y Tecnología de la Universidad Tecnológica Nacional, por el apoyo brindado a través del programa de Becas Bicentenario, convocatoria 2011, y la financiación del proyecto de investigación UTN – 1653, disposición SECyT 63/12, “Caracterización Experimental y Modelación Numérica del Proceso de Erosión General en Cauces Arenosos con Curvas”.

INDICE

Índice de Figuras	7
Índice de Tablas.....	19
CAPÍTULO 1	22
Introducción.....	22
Estado del Arte	24
Estudios experimentales en cauces aluviales.....	24
Evolución de las técnicas de medición en canales de laboratorio	27
Sensores de Movimiento.....	30
Objetivos Generales y Específicos	32
Producción científica, becas y proyectos relacionados al presente trabajo	33
CAPÍTULO 2	35
Materiales y Métodos	35
Canal experimental. Desarrollo y Características.....	35
Caracterización del Material Aluvial Componente.....	39
Sistema de medición y regulación de caudales líquidos	43
Sistema de medición de caudales sólidos	44
Distanciómetro laser. Análisis de precisión e incertidumbres	46
Sensores de Movimiento.....	51
Generalidades y Definiciones	51
Análisis de la calidad de las mediciones. Casos de Estudio	54
Comparación entre distintos sensores y librerías de captura y procesamiento.....	59
CAPÍTULO 3	61
Puesta a Punto del Canal Experimental	61
Experimentos en canales rectilíneos	61
Experimentos en canales con curvas.....	67

Determinación de los escenarios factibles.....	67
CAPÍTULO 4.....	74
Desarrollo de una Técnica de Medición con un Sensor de Movimiento en Geometrías Secas.....	74
Técnica y Procedimiento	74
Análisis de la captura. Selección de los parámetros óptimos	74
Relevamiento de grandes superficies. Concatenación	80
Aplicación. Superficies Relevadas.....	82
CAPÍTULO 5.....	85
Técnica No Intrusiva para la Medición de la Evolución Temporal y Espacial de un Cauce Aluvial en el canal Experimental	85
Medición a través del agua con un sensor de movimiento	85
Mediciones controladas con agua filtrada	85
Errores en las mediciones. Modelo de corrección	86
Medición con distintos niveles de turbidez.....	89
Técnica para determinar el nivel de turbidez a través del análisis de imágenes... ..	89
Definición del dominio de medición.....	91
Técnica no intrusiva para la medición de la evolución temporal de cauces aluviales en laboratorio.....	93
Aplicación a un modelo Físico	97
CAPÍTULO 6.....	101
Discusión y Resultados	101
CAPÍTULO 7.....	110
Conclusiones	110
CAPÍTULO 8.....	113
Referencias Bibliográficas	113

Referencias	113
ANEXO I	119
Mediciones realizadas para la determinación del ángulo de fricción interna del material aluvial componente del canal experimental.....	119
Mediciones realizadas con distanciómetro	121
ANEXO II	132
Secciones relevadas con distanciómetro en los experimentos realizados sobre un canal rectilíneo.	132
ANEXO III	146
Configuraciones geométricas en planta a partir de las cuales se alcanza el equilibrio hidrosedimentológico en el canal experimental, a partir de las combinaciones de pendiente y caudal detalladas en la Tabla 9	146
ANEXO IV	149
Relevamientos realizados sobre los experimentos descritos en la Tabla 9 en formato raster.	149
ANEXO V	164
Relevamientos a tiempo real. Comparación entre las superficies relevadas previas y posteriores a la corrección.	164

Índice de Figuras

Figura 1: Sistemas de recirculación de sólidos en los equipos experimentales (Rathbun, et al, 1969).....	25
Figura 2: Método de las curvas de nivel para relevamientos altimétricos en modelos físicos	28
Figura 3: Imagen RGB de la batimetría de un cauce natural (A), Información batimétrica obtenida con un sensor de movimiento (B). (Mankoff et al., 2012).....	30
Figura 4: Utilización de la Microsoft Kinect para la determinación del tamaño de sedimento en cauces aluviales. (Dalla Mura, 2012).....	32
Figura 5: Arreglo Diseño original del canal experimental – dimensiones en metros (Weber y Bupo, 2013).....	35
Figura 6: Carro desplazable	37
Figura 7: Cisterna semi-enterrada.....	37
Figura 8: Tolva de ingreso y egreso a la izquierda, disipador de energía a la derecha..	38
Figura 9: Compuerta de restitución a la izquierda, encauzador de flujo a la derecha ..	39
Figura 10: Curva granulométrica del material aluvial componente del canal experimental.....	40
Figura 11: Cono de arena.....	41
Figura 12: a la izquierda el esquema utilizado para el ensayo N° 1 y el sumergido, a la derecha el correspondiente al ensayo N° 2.	42
Figura 13: se observan los gráficos de caja realizados para los tres ensayos. A la izquierda para las mediciones realizadas con el primer esquema de experimentación, al centro las correspondientes al segundo esquema, y a la derecha las mediciones sobre arena sumergida.....	43
Figura 14: Sistema de medición de caudales líquidos.....	43
Figura 15: Curva de funcionamiento – Válvula esclusa.....	44
Figura 16: curva de funcionamiento – válvula mariposa	44
Figura 17: medidor de caudal sólido	45
Figura 18: configuraciones de filtros ensayadas	45
Figura 19: Distanciómetro Laser BOSCH DEL 70 Professional.....	46

Figura 20: Esquema del equipo para realizar las mediciones sobre las distintas superficies de arena con el distanciómetro láser.....	47
Figura 21: Dispositivo para generar las superficies de arena con inclinación conocida, para realizar los relevamientos con distanciómetro láser	48
Figura 22: Distribución de frecuencias obtenido para el residuo calculado (arena fina $d_{50} = 0.296$ mm).....	49
Figura 23: Valor medio del desvío estándar y el error cuadrático obtenido a partir de las mediciones realizadas sobre arena fina húmeda en función de la inclinación de la superficie relevada	50
Figura 24: Valor medio del desvío estándar y el error cuadrático obtenido a partir de las mediciones realizadas sobre arena fina seca en función de la inclinación de la superficie relevada	50
Figura 25: Valor medio del desvío estándar y el error cuadrático obtenido a partir de las mediciones realizadas sobre arena gruesa seca	51
Figura 26: Microsoft Kinect a la izquierda, ASUS Xtion Pro a la derecha	51
Figura 27: a la izquierda imagen infrarroja del espectro proyectado, a la derecha imagen de disparidad resultante (Khoshelham, 2011)	52
Figura 28: esquema de medición del sensor de movimiento (adaptado de Khoshelham, 2012).....	53
Figura 29: Esquema de sistema de coordenadas globales o en mundo real	54
Figura 30: Medición sobre canal rectilíneo de sección trapezoidal	55
Figura 31: Valores de “Step Size” (ΔZ_k). A modo de ejemplo y por razones de prolijidad se graficaron los valores correspondientes a una fila de la imagen. Las mediciones se realizaron sobre una superficie plana horizontal.....	55
Figura 32: DN y step size vs distancia de medición (Mankoff y Russo, 2012).....	56
Figura 33: Variación de los valores de Z_0 en el dominio capturado	57
Figura 34: Diferencia entre los valores Z_k y el mínimo de la captura.....	57
Figura 35: Perfil obtenido con mediciones de XtionPro, con distanciómetro, y su diferencia	57
Figura 36: Evolución temporal del valor de tres píxeles correspondientes a la distancia a una superficie plana horizontal	58

Figura 37: Evolución temporal del desvío estándar del valor de profundidad de un píxel, calculado para intervalos de 10 minutos.....	58
Figura 38: Mediciones realizadas con dos sensores distintos (kinect y XtionPro) y procesadas con dos librerías	59
Figura 39: Sección del canal a 2 hs del comienzo (izquierda), 14hs (centro) y sección final (derecha).....	62
Figura 40: Configuración de las distintas secciones de control.....	63
Figura 41: Relación entre la profundidad relativa y la razón de aspecto. El rectángulo con la trama es el área esperada o factible.....	63
Figura 42: Relación entre el caudal adimensional y la Razón de aspecto para canales de laboratorio y naturales que han alcanzado la estabilidad	64
Figura 43: Tendencia a la formación de barras, fotografía tomada luego de 40 hs de ensayo aprox. Con un caudal 0.63 l/s y una pendiente de 2.5×10^{-3}	65
Figura 44: Diagrama de Yalin – Ferreira (2001) para la clasificación de barras sedimentarias	65
Figura 45: Relación entre la pendiente y la Concentración correspondientes a experimentos sobre canales rectilíneos que han alcanzado el equilibrio hidrosedimentológico.....	66
Figura 46: Sección inicial de geometría curva	68
Figura 47: Ancho insuficiente del equipo experimental en el primer ensayo realizado con la Geometría 1	68
Figura 48: Configuración en planta. Sección inicial. Geometría 1.....	69
Figura 49: Ancho insuficiente del canal experimental en ensayo realizado con la Geometría 1.....	69
Figura 50: Configuración en planta. Sección inicial. Geometría 2.....	70
Figura 51: Configuración en planta. Sección inicial. Geometría 3.....	70
Figura 52: a la izquierda la sección inicial y a la derecha la sección erosionada poniendo en evidencia el ancho insuficiente	71
Figura 53: Configuración en planta. Sección inicial. Geometría 5.....	71
Figura 54: Sección inicial a la izquierda (Geometría 6), en el centro a las 30 hs de ensayo y a la derecha, la sección erosionada donde finalmente se alcanzó el equilibrio hidrosedimentológico (48 hs de ensayo)	72

Figura 55: Configuración en planta. Sección inicial. Geometría 6.....	73
Figura 56: Configuración en planta. Sección inicial. Geometría 8.....	73
Figura 57: puntos cuyo rango es mayor a 6 mm dentro de la imagen relevada.....	75
Figura 58: Media de los v.a. de los residuos para cada tamaño de ventana	76
Figura 59: Frecuencia de los residuos para distintos mensurandos	77
Figura 60: Coordenadas de la esquina correspondiente a la sub matriz de 320 x 240. El punto indica la posición centrada.	77
Figura 61: variación espacial de valor absoluto del residuo (en mm).....	78
Figura 62: porcentaje de puntos cuyo residuo se encuentra por encima de un determinado valor límite para distintas observaciones, a la izquierda con un límite menor a 2 mm y a la derecha de 2 a 4 mm.	79
Figura 63: Curva de Frecuencia relativa acumulada de los residuos para observaciones con distinta cantidad de imágenes promediadas.....	79
Figura 64: Proceso de superposición y concatenación de imágenes en una dirección .	80
Figura 65: A la izquierda los ejes de la cámara son paralelos a la dirección del desplazamiento, a la derecha no.....	81
Figura 66: A la izquierda la cámara se encuentra paralela al plano de desplazamiento, a la derecha no	81
Figura 67: Esquema de procesamiento de datos para facilitar la manipulación de la información.	83
Figura 68: A la izquierda, relevamiento previo al comienzo el experimento, al centro el relevamiento de la geometría luego de culminado el experimento y a la derecha se adicionaron las curvas de nivel.....	84
Figura 69: Recipiente prismático de vidrio construido para realizar mediciones controladas a través de agua con el sensor de movimiento.....	86
Figura 70: mediciones de una superficie plana horizontal con diferentes niveles de profundidad de agua	86
Figura 71: definición de las variables que intervienen en las mediciones a través del agua	87
Figura 72: variación del error e en función de la profundidad de agua.....	88
Figura 73: relación entre h y hp.....	88
Figura 74: Fotografía tomada en t = 0 a la izquierda y en t = 840 seg a la derecha.....	90

Figura 75.- Variación de la intensidad de color en función del tiempo (ensayo 1).....	90
Figura 76.- Comparación de los valores obtenidos en los dos ensayos para la misma concentración de arcilla	91
Figura 77.- Variación del valor medio de la profundidad en función de la concentración de arcilla	92
Figura 78: relación entre las concentraciones ensayadas y la turbidez en NTU. En línea punteada se ajustó una línea de tendencia lineal.....	92
Figura 79.- combinaciones límites de profundidad – turbidez a partir de las cuales el sensor deja de medir	93
Figura 80: arriba imágenes capturadas con la cámara infrarroja, abajo con la cámara rgb.....	94
Figura 81: Operaciones o Transformaciones básicas 2D aplicables sobre las imágenes (Szeliski, 2010)	95
Figura 82: representación gráfica de la ecuación 21. Rotación y traslación aplicadas a una imagen	95
Figura 83: Transformación geométrica. A la izquierda imagen IR en escala de grises, a la derecha la RGB.	96
Figura 84: .Imagen RGB rectificada con los puntos para determinar P	96
Figura 85: modelo de un plano que representa la superficie del cuerpo de agua	97
Figura 86.- geometría de la sección inicial ensayada, las dimensiones se encuentran en metros. En línea de trazo el sector de captura	98
Figura 87.- Evolución temporal de la coordenada Z_k , de tres puntos que se encuentran dentro del canal.....	99
Figura 88.- a la izquierda las curvas hipsométricas de la sección al comenzar el ensayo, al centro a la hora de comenzado el ensayo y a la derecha a las 40 hs.....	99
Figura 89.- isoclinas de los valores medidos a las 6 hs y de ensayo, a la izquierda las correspondientes a las mediciones sin corregir, al centro las corregidas y a la derecha las isoclinas de las correcciones realizadas.....	100
Figura 90: la primer imagen (de izquierda a derecha) corresponde a la sección erosionada con 5 mm de agua, la segunda con 5, la tercera con 10 y con 25 la última.	101

Figura 91: a la izquierda una imagen rasterizada de la sección inicial y erosionada, y a la derecha la gráfica de los perfiles que se indican.....	102
Figura 92: variación del volumen erosionado en función de la pendiente general del cauce.....	103
Figura 93: ancho superficial B en función del caudal líquido para tres de las pendientes ensayadas.	103
Figura 94: Sección transversal del canal relevado con sensor de movimiento y distanciómetro laser.....	104
Figura 95.- en la columna de la izquierda, la imagen RGB y los perfiles señalados a los 5 minutos de ensayo, en la central a las 6 hs y a la derecha a las 40 hs. En todos los casos los puntos azules son sin corregir y los rojos corregidos.	106
Figura 96.- En la primer fila se encuentran las isocurvas de los valores medidos a los 5 minutos del comienzo del ensayo, y en la segunda fila a las 40 hs de ensayo.	107
Figura 97: Evolución del volumen erosionado en la zona sumergida de la captura....	108
Figura 98.- curva de frecuencias acumuladas del error relativo para una superficie plana horizontal en azul, para las mediciones realizadas sobre arena seca en rojo y en verde la correspondiente a los puntos que fueron corregidos.	109
Figura 99.- Valores de profundidad medidos sin agua Vs los valores corregidos. En rojo se superpone la recta identidad a la nube de puntos y en color púrpura los correspondientes a la identidad ± 1 mm.....	109
Figura 100: Geometría 1.....	146
Figura 101: Geometría 2.....	146
Figura 102: Geometría 3.....	146
Figura 103: Geometría 4.....	147
Figura 104: Geometría 5.....	147
Figura 105: Geometría 6.....	147
Figura 106: Geometría 7.....	147
Figura 107: Geometría 8.....	148
Figura 108: a la izquierda el relevamiento previo al comienzo del experimento, al centro la geometría luego de culminado el experimento y a la derecha se adicionaron las curvas de nivel. Se experimentó con la Geometría 6, una caudal de 0.20 l/s y una pendiente de 0.6 %.....	149

Figura 109: Los dos perfiles señalados en planta en la Figura 108.	149
Figura 110: a la izquierda el relevamiento previo al comienzo del experimento, al centro la geometría luego de culminado el experimento y a la derecha se adicionaron las curvas de nivel. Se experimentó con la Geometría 6, una caudal de 0.16 l/s y una pendiente de 0.6 %.....	150
Figura 111: Los dos perfiles señalados en planta en la Figura 110.	150
Figura 112: a la izquierda el relevamiento previo al comienzo del experimento, al centro la geometría luego de culminado el experimento y a la derecha se adicionaron las curvas de nivel. Se experimentó con la Geometría 8, una caudal de 0.20 l/s y una pendiente de 0.6 %.....	151
Figura 113: Los dos perfiles señalados en planta en la Figura 112.	151
Figura 114: a la izquierda el relevamiento previo al comienzo del experimento, al centro la geometría luego de culminado el experimento y a la derecha se adicionaron las curvas de nivel. Se experimentó con la Geometría 8, una caudal de 0.13 l/s y una pendiente de 0.6 %.....	152
Figura 115: Los dos perfiles señalados en planta en la Figura 114.	152
Figura 116: a la izquierda el relevamiento previo al comienzo del experimento, al centro la geometría luego de culminado el experimento y a la derecha se adicionaron las curvas de nivel. Se experimentó con la Geometría 6, una caudal de 0.15 l/s y una pendiente de 0.9 %.....	153
Figura 117: Los dos perfiles señalados en planta en la Figura 116.	153
Figura 118: a la izquierda el relevamiento previo al comienzo del experimento, al centro la geometría luego de culminado el experimento y a la derecha se adicionaron las curvas de nivel. Se experimentó con la Geometría 8, una caudal de 0.20 l/s y una pendiente de 0.9 %.....	154
Figura 119: Los dos perfiles señalados en planta en la Figura 118.	154
Figura 120: a la izquierda el relevamiento previo al comienzo del experimento, al centro la geometría luego de culminado el experimento y a la derecha se adicionaron las curvas de nivel. Se experimentó con la Geometría 8, una caudal de 0.15 l/s y una pendiente de 0.9 %.....	155
Figura 121: Los dos perfiles señalados en planta en la Figura 120.	155

Figura 122: a la izquierda el relevamiento previo al comienzo del experimento, al centro la geometría luego de culminado el experimento y a la derecha se adicionaron las curvas de nivel. Se experimentó con la Geometría 8, una caudal de 0.13 l/s y una pendiente de 0.9 %.....	156
Figura 123: Los dos perfiles señalados en planta en la Figura 122.	156
Figura 124: a la izquierda el relevamiento previo al comienzo del experimento, al centro la geometría luego de culminado el experimento y a la derecha se adicionaron las curvas de nivel. Se experimentó con la Geometría 6, una caudal de 0.24 l/s y una pendiente de 1.2 %.....	157
Figura 125: Los dos perfiles señalados en planta en la Figura 124.	157
Figura 126: a la izquierda el relevamiento previo al comienzo del experimento, al centro la geometría luego de culminado el experimento y a la derecha se adicionaron las curvas de nivel. Se experimentó con la Geometría 6, una caudal de 0.16 l/s y una pendiente de 1.2 %.....	158
Figura 127: Los dos perfiles señalados en planta en la Figura 126.	158
Figura 128: a la izquierda el relevamiento previo al comienzo del experimento, al centro la geometría luego de culminado el experimento y a la derecha se adicionaron las curvas de nivel. Se experimentó con la Geometría 8, una caudal de 0.11 l/s y una pendiente de 1.2 %.....	159
Figura 129: Los dos perfiles señalados en planta en la Figura 128.	159
Figura 130: a la izquierda el relevamiento previo al comienzo del experimento, al centro la geometría luego de culminado el experimento y a la derecha se adicionaron las curvas de nivel. Se experimentó con la Geometría 8, una caudal de 0.16 l/s y una pendiente de 1.2 %.....	160
Figura 131: Los dos perfiles señalados en planta en la Figura 130.	160
Figura 132: a la izquierda el relevamiento previo al comienzo del experimento, al centro la geometría luego de culminado el experimento y a la derecha se adicionaron las curvas de nivel. Se experimentó con la Geometría 6, una caudal de 0.12 l/s y una pendiente de 1.8 %.....	161
Figura 133: Los dos perfiles señalados en planta en la Figura 132.	161
Figura 134: a la izquierda el relevamiento previo al comienzo del experimento, al centro la geometría luego de culminado el experimento y a la derecha se adicionaron	

las curvas de nivel. Se experimentó con la Geometría 6, una caudal de 0.08 l/s y una pendiente de 1.8 %.....	162
Figura 135: Los dos perfiles señalados en planta en la Figura 134.	162
Figura 136: a la izquierda el relevamiento previo al comienzo del experimento, al centro la geometría luego de culminado el experimento y a la derecha se adicionaron las curvas de nivel. Se experimentó con la Geometría 8, una caudal de 0.13 l/s y una pendiente de 1.8 %.....	163
Figura 137: Los dos perfiles señalados en planta en la Figura 136.	163
Figura 138: en la columna de la izquierda, la imagen RGB y los perfiles señalados a los 5 minutos de ensayo, en la central a las 6 hs y a la derecha a las 40 hs. En todos los casos los puntos azules son sin corregir y los rojos corregidos. El experimento corresponde a la Geometría 6, con un caudal de 0.16 l/s y una pendiente de 0.6%.....	165
Figura 139: curvas hipsométricas de la sección relevada, a la izquierda a los 5 minutos de ensayo, en el centro a las 6 hs y a la derecha a las 40 hs. El experimento corresponde a la Geometría 6, con un caudal de 0.16 l/s y una pendiente de 0.6%. .	166
Figura 140.- isoclinas de la superficie relevada a las 6 hs de ensayo, a la izquierda las correspondientes a las mediciones sin corregir, al centro las corregidas y a la derecha las isoclinas de las correcciones realizadas. El experimento corresponde a la Geometría 6, con un caudal de 0.16 l/s y una pendiente de 0.6%.....	166
Figura 141: en la columna de la izquierda, la imagen RGB y los perfiles señalados a los 5 minutos de ensayo, en la central a las 6 hs y a la derecha a las 40 hs. En todos los casos los puntos azules son sin corregir y los rojos corregidos. El experimento corresponde a la Geometría 6, con un caudal de 0.20 l/s y una pendiente de 0.6%.....	167
Figura 142: curvas hipsométricas de la sección relevada, a la izquierda a los 5 minutos de ensayo, en el centro a las 6 hs y a la derecha a las 40 hs. El experimento corresponde a la Geometría 6, con un caudal de 0.20 l/s y una pendiente de 0.6%. .	168
Figura 143: isoclinas de la superficie relevada a las 6 hs de ensayo, a la izquierda las correspondientes a las mediciones sin corregir, al centro las corregidas y a la derecha las isoclinas de las correcciones realizadas. El experimento corresponde a la Geometría 6, con un caudal de 0.20 l/s y una pendiente de 0.6%.....	168
Figura 144: en la columna de la izquierda, la imagen RGB y los perfiles señalados a los 5 minutos de ensayo, en la central a las 6 hs y a la derecha a las 40 hs. En todos los casos	

los puntos azules son sin corregir y los rojos corregidos. El experimento corresponde a la Geometría 6, con un caudal de 0.25 l/s y una pendiente de 0.6%.....	169
Figura 145: curvas hipsométricas de la sección relevada, a la izquierda a los 5 minutos de ensayo, en el centro a las 6 hs y a la derecha a las 40 hs. El experimento corresponde a la Geometría 6, con un caudal de 0.25 l/s y una pendiente de 0.6%. .	170
Figura 146: isoclinas de la superficie relevada a las 6 hs de ensayo, a la izquierda las correspondientes a las mediciones sin corregir, al centro las corregidas y a la derecha las isoclinas de las correcciones realizadas. El experimento corresponde a la Geometría 6, con un caudal de 0.25 l/s y una pendiente de 0.6%.....	170
Figura 147: en la columna de la izquierda, la imagen RGB y los perfiles señalados a los 5 minutos de ensayo, en la central a las 6 hs y a la derecha a las 40 hs. En todos los casos los puntos azules son sin corregir y los rojos corregidos. El experimento corresponde a la Geometría 6, con un caudal de 0.15l/s y una pendiente de 0.9%.....	171
Figura 148: curvas hipsométricas de la sección relevada, a la izquierda a los 5 minutos de ensayo, en el centro a las 6 hs y a la derecha a las 40 hs. El experimento corresponde a la Geometría 6, con un caudal de 0.15 l/s y una pendiente de 0.9%. .	172
Figura 149: isoclinas de la superficie relevada a las 6 hs de ensayo, a la izquierda las correspondientes a las mediciones sin corregir, al centro las corregidas y a la derecha las isoclinas de las correcciones realizadas. El experimento corresponde a la Geometría 6, con un caudal de 0.15 l/s y una pendiente de 0.9%.....	172
Figura 150: en la columna de la izquierda, la imagen RGB y los perfiles señalados a los 5 minutos de ensayo, en la central a las 6 hs y a la derecha a las 40 hs. En todos los casos los puntos azules son sin corregir y los rojos corregidos. El experimento corresponde a la Geometría 6, con un caudal de 0.20l/s y una pendiente de 0.9%.....	173
Figura 151: curvas hipsométricas de la sección relevada, a la izquierda a los 5 minutos de ensayo, en el centro a las 6 hs y a la derecha a las 40 hs. El experimento corresponde a la Geometría 6, con un caudal de 0.20 l/s y una pendiente de 0.9%. .	174
Figura 152: isoclinas de la superficie relevada a las 6 hs de ensayo, a la izquierda las correspondientes a las mediciones sin corregir, al centro las corregidas y a la derecha las isoclinas de las correcciones realizadas. El experimento corresponde a la Geometría 6, con un caudal de 0.20 l/s y una pendiente de 0.9%.....	174

Figura 153: en la columna de la izquierda, la imagen RGB y los perfiles señalados a los 5 minutos de ensayo, en la central a las 6 hs y a la derecha a las 40 hs. En todos los casos los puntos azules son sin corregir y los rojos corregidos. El experimento corresponde a la Geometría 6, con un caudal de 0.08l/s y una pendiente de 1.2%..... 175

Figura 154: curvas hipsométricas de la sección relevada, a la izquierda a los 5 minutos de ensayo, en el centro a las 6 hs y a la derecha a las 40 hs. El experimento corresponde a la Geometría 6, con un caudal de 0.08 l/s y una pendiente de 1.2%. . 176

Figura 155: isolineas de la superficie relevada a las 6 hs de ensayo, a la izquierda las correspondientes a las mediciones sin corregir, al centro las corregidas y a la derecha las isolineas de las correcciones realizadas. El experimento corresponde a la Geometría 6, con un caudal de 0.08 l/s y una pendiente de 1.2%..... 176

Figura 156: en la columna de la izquierda, la imagen RGB y los perfiles señalados a los 5 minutos de ensayo, en la central a las 6 hs y a la derecha a las 40 hs. En todos los casos los puntos azules son sin corregir y los rojos corregidos. El experimento corresponde a la Geometría 6, con un caudal de 0.16l/s y una pendiente de 1.2%..... 177

Figura 157: curvas hipsométricas de la sección relevada, a la izquierda a los 5 minutos de ensayo, en el centro a las 6 hs y a la derecha a las 40 hs. El experimento corresponde a la Geometría 6, con un caudal de 0.16 l/s y una pendiente de 1.2%. . 178

Figura 158: isolineas de la superficie relevada a las 7 hs de ensayo, a la izquierda las correspondientes a las mediciones sin corregir, al centro las corregidas y a la derecha las isolineas de las correcciones realizadas. El experimento corresponde a la Geometría 6, con un caudal de 0.16 l/s y una pendiente de 1.2%..... 178

Figura 159: en la columna de la izquierda, la imagen RGB y los perfiles señalados a los 5 minutos de ensayo, en la central a las 6 hs y a la derecha a las 40 hs. En todos los casos los puntos azules son sin corregir y los rojos corregidos. El experimento corresponde a la Geometría 6, con un caudal de 0.15l/s y una pendiente de 1.8%..... 179

Figura 160: curvas hipsométricas de la sección relevada, a la izquierda a los 5 minutos de ensayo, en el centro a las 6 hs y a la derecha a las 40 hs. El experimento corresponde a la Geometría 6, con un caudal de 0.15 l/s y una pendiente de 1.8%. . 180

Figura 161: isolineas de la superficie relevada a las 6 hs de ensayo, a la izquierda las correspondientes a las mediciones sin corregir, al centro las corregidas y a la derecha

las isoclinas de las correcciones realizadas. El experimento corresponde a la Geometría 6, con un caudal de 0.15 l/s y una pendiente de 1.8%..... 180

Índice de Tablas

Tabla 1: Resultados de los ensayos realizados sobre las 5 muestras de arena	40
Tabla 2: Resultados de los ensayos para la determinación de la Gravedad específica .	41
Tabla 3: Valores obtenidos del ángulo de fricción interna del material componente del canal experimental	42
Tabla 4: Resultados de los ensayos realizados para la selección de la configuración del filtro	45
Tabla 5: Características técnicas del distanciómetro laser	46
Tabla 6: mediciones realizadas sobre una superficie de arena fina húmeda a 10 °.....	49
Tabla 7: Combinaciones de variables ensayadas	61
Tabla 8: Resumen de resultados de los ensayos realizados sobre canales de eje rectilíneo para la validación y puesta a punto del equipo experimental.....	66
Tabla 9: Resumen de experimentos realizados en canales con curvas.....	72
Tabla 10: Experimentos sobre los cuales se realizaron mediciones evolutivas	104
Tabla 11: Mediciones correspondientes al ensayo N° 1	119
Tabla 12: Mediciones correspondientes al ensayo N° 2	120
Tabla 13: Mediciones correspondientes al ensayo sumergido	120
Tabla 14: tabla de datos y parámetros estadísticos para la superficie de arena fina húmeda horizontal	121
Tabla 15: tabla de datos y parámetros estadísticos para la superficie de arena fina húmeda a 5 °	121
Tabla 16: tabla de datos y parámetros estadísticos para la superficie de arena fina húmeda a 10 °	122
Tabla 17: tabla de datos y parámetros estadísticos para la superficie de arena fina húmeda a 15 °	122
Tabla 18: tabla de datos y parámetros estadísticos para la superficie de arena fina húmeda a 20 °	123
Tabla 19: tabla de datos y parámetros estadísticos para la superficie de arena fina húmeda a 25 °	123
Tabla 20: tabla de datos y parámetros estadísticos para la superficie de arena fina húmeda a 30 °	124

Tabla 21: tabla de datos y parámetros estadísticos para la superficie de arena fina húmeda a 35 °	124
Tabla 22: tabla de datos y parámetros estadísticos para la superficie de arena fina húmeda a 40 °	125
Tabla 23: tabla de datos y parámetros estadísticos para la superficie de arena fina húmeda a 45 °	125
Tabla 24: tabla de datos y parámetros estadísticos para la superficie de arena fina seca a horizontal.....	126
Tabla 25: tabla de datos y parámetros estadísticos para la superficie de arena fina seca a 5 °.....	126
Tabla 26: tabla de datos y parámetros estadísticos para la superficie de arena fina seca a 10 °.....	127
Tabla 27: tabla de datos y parámetros estadísticos para la superficie de arena fina seca a 15 °.....	127
Tabla 28: tabla de datos y parámetros estadísticos para la superficie de arena fina seca a 20 °.....	128
Tabla 29: tabla de datos y parámetros estadísticos para la superficie de arena fina seca a 25 °.....	128
Tabla 30: tabla de datos y parámetros estadísticos para la superficie de arena fina seca a 30 °.....	129
Tabla 31: tabla de datos y parámetros estadísticos para la superficie de arena gruesa horizontal.....	129
Tabla 32: tabla de datos y parámetros estadísticos para la superficie de arena gruesa seca a 10 °.....	130
Tabla 33: tabla de datos y parámetros estadísticos para la superficie de arena gruesa seca a 20 °.....	130
Tabla 34: tabla de datos y parámetros estadísticos para la superficie de arena gruesa seca a 30 °.....	131
Tabla 35: Mediciones correspondientes al ensayo N° 1	132
Tabla 36: Mediciones correspondientes al ensayo N° 2	134
Tabla 37: Mediciones correspondientes al ensayo N° 3	136
Tabla 38: Mediciones correspondientes al ensayo N° 4	139

Tabla 39: Mediciones correspondientes al ensayo N° 5	142
Tabla 40: Mediciones correspondientes al ensayo N° 6	144

CAPÍTULO 1

Introducción

Desde la época de Da Vinci (1452 – 1519), el hombre ha intentado estudiar los fenómenos hidráulicos fluviales con la intención comprender sus comportamientos y poder representarlos a través de expresiones matemáticas. Las primeras observaciones se realizaron sobre cauces naturales, a partir de los cuales fue posible medir algunos parámetros topográficos, y estimar valores de velocidad media que dieron origen a las primeras expresiones cuantitativas (Chow, 1994), como por ejemplo la ecuación de resistencia al flujo de Antonie Chézy (1718 – 1798).

El reconocimiento de las características del flujo en cauces naturales, el estudio y medición de los parámetros hidráulicos y morfológicos han permitido a fines del siglo XIX el desarrollo de las ecuaciones diferenciales que dan una aproximación bidimensional al flujo a superficie libre. Estas tenían una serie de problemas difíciles de solucionar para la época, el primero era la ausencia de computadores que permitan implementar soluciones numéricas a estas ecuaciones, y la segunda, y más significantes desde el punto de vista físico, es que éstas no consideran la variación de la forma del lecho del cauce, cosa que sí sucede en los fenómenos naturales. Estos fenómenos son sumamente complejos e impredecibles, y el estudio matemático en forma completa es realmente complejo, por las escalas espaciales y sobre todo por las temporales, o combinaciones de ellas.

A partir de esto último cobran especial relevancia los experimentos de laboratorio. Desde aquellas épocas al día de la fecha, continúan existiendo fenómenos naturales impredecibles y que si bien existen aproximaciones matemáticas, las modelaciones físicas no han podido ser reemplazadas para su descripción. Este tipo de modelaciones se realizan en laboratorio bajo condiciones controladas, es decir, es posible decidir el tipo del material componente, el tamaño del mismo, las pendientes de ensayo, los caudales que circulan, etc.

En el ámbito de la hidráulica fluvial, los experimentos se fueron desarrollando en los equipos experimentales antes mencionados, los cuales en general están compuestos por una caja que aloja el material componente del lecho, una cisterna de

almacenamiento de agua y un sistema de bombeo o recirculación. Entre estos equipos experimentales, aparecen dos ramas en donde se diferencian claramente los tipos de experimentos a realizar y los parámetros a medir, ellos son: los canales a fondo fijo, y los canales a fondo móvil. En estos últimos la morfología del cauce se modifica continuamente, por lo que su geometría es una de las principales variables a medir.

La calidad en este tipo de mediciones es de gran importancia en el ámbito de la hidráulica fluvial, ya que a partir de estos valores se calculan parámetros hidráulicos como el radio hidráulico, el perímetro mojado, el área de la sección, etc, y es posible caracterizar aspectos morfológicos como las formas de fondo, su tamaño, posición, etc.

En los capítulos siguientes, se mencionarán las técnicas de relevamiento topográfico que se han utilizado a lo largo del tiempo, la evolución de las mismas, y el estado actual en cuanto a los nuevos desarrollos.

Las tendencias actuales de los relevamientos topográficos en laboratorio apuntan a la generación de modelos digitales de elevación (MDE), ya que la información es posible ordenarla en formato raster con sus consecuentes ventajas en los tamaños de almacenamiento y a su vez permite ser manipulada a través de Sistemas de Información Geográfica (Puebla y Gould, 1994).

Los métodos tradicionales para la ejecución de esta tarea (relevamientos con reglas y niveles, más actualmente con distanciómetros láser), son realmente ineficientes a la hora de generar MDE, ya que las mediciones que se realizan son puntuales, y la densidad de éstos (o expresado de otra manera el tamaño del pixel) depende de la voluntad del operador. Estos equipos han sido diseñados para mediciones puntuales, y no para la generación de este tipo de información.

En vista de las carencias de los sistemas tradicionales para representar la información en el formato mencionado o similar, aparecen nuevos dispositivos que permiten escanear las superficies logrando MDE de alta resolución y calidad en la información.

Muchos de estos equipos fueron desarrollados específicamente para las tareas de relevamiento topográfico; el problema en común que poseen todos ellos son los costos (entre USD 5.000 a USD 15.000).

Mankoff y Russo (2012) introducen al área de las Ciencias de la Tierra a los sensores de movimiento o cámaras de profundidad, entre ellos la Microsoft Kinect de Microsoft y

la XtionPro de ASUS, como posibles alternativas para la generación de superficies tridimensionales a bajo costo (USD 150 aproximadamente).

Estado del Arte

Estudios experimentales en cauces aluviales

Durante muchos años se han intentado conocer los fenómenos de transporte de sedimento y resistencia al flujo en canales aluviales. A partir de estas inquietudes diversas ramas de investigación se han desarrollado, las cuales pueden ser agrupadas en dos grandes conjuntos, los estudios analíticos o teóricos, y los estudios experimentales y empíricos.

A partir de la década del 50, es que se comienzan a estudiar los fenómenos fluviales desde una perspectiva analítica, Glover y Florey (1951) se encuentran entre los primeros investigadores en lograr una expresión analítica de base física en donde se determina la geometría del canal a través de un balance de fuerzas (Vigilar Jr., 1997). A partir de allí numerosos autores continuaron con esta línea de trabajo donde se han registrado importantes avances y discusiones al respecto.

Más antiguamente se han realizado numerosos esfuerzos por entender la naturaleza de los fenómenos a través de experimentos de laboratorio. Estos experimentos han intentado simular canales aluviales bajo condiciones controladas de laboratorio. Uno de los primeros y más extensos trabajos registrados fue realizado por Gilbert (1914), quien estudió el transporte de arena bajo diversas condiciones de flujo.

Los equipos experimentales que se han utilizado a lo largo del tiempo son muy similares entre sí, y en términos generales están compuestos por un recipiente prismático donde se aloja el material aluvial, una tolva de ingreso y otra de egreso, una cisterna donde se aloja una bomba de impulsión de agua y un sistema que permita recorrer toda la superficie del canal (carro de traslación). A partir de esta configuración base, se presentan tipologías que permiten controlar ciertas variables, por ejemplo, canales de pendiente variable, canales con o sin recirculación de agua, canales con o sin recirculación de sedimentos, etc. Este último aspecto, es quizás el avance más significativo que han sufrido los canales experimentales. Hasta la década del 50' la recirculación de sedimentos se realizaba a través de una técnica conocida como "sand feet system", y posteriormente, con la evolución de los sistemas de bombeo, aparece

lo que se conoce como “recirculation system” (Figura 1). El procedimiento para la aplicación de estas técnicas, una serie de experimentos realizados y la comparación de resultados, se encuentran bien documentados en el trabajo publicado por Rathbun et al (1969), donde se observa que los valores medios de los resultados no varían significativamente con una u otra técnica, lo que da validez a numerosos ensayos realizados en la primer mitad del siglo 20, los cuales fueron recopilados por Johnson (1943).

Los experimentos realizados por Rathbun et al (op. cit) se practicaron sobre un canal de 10 m de largo, 20 cm de ancho y 20 cm de profundidad, el mismo tenía la capacidad de variar la pendiente en 0 y 8.5 %, y el rango de caudales ensayos fue de 0 a 100 l/s. El material alluvial tenía un d_{50} de 0.3 mm.

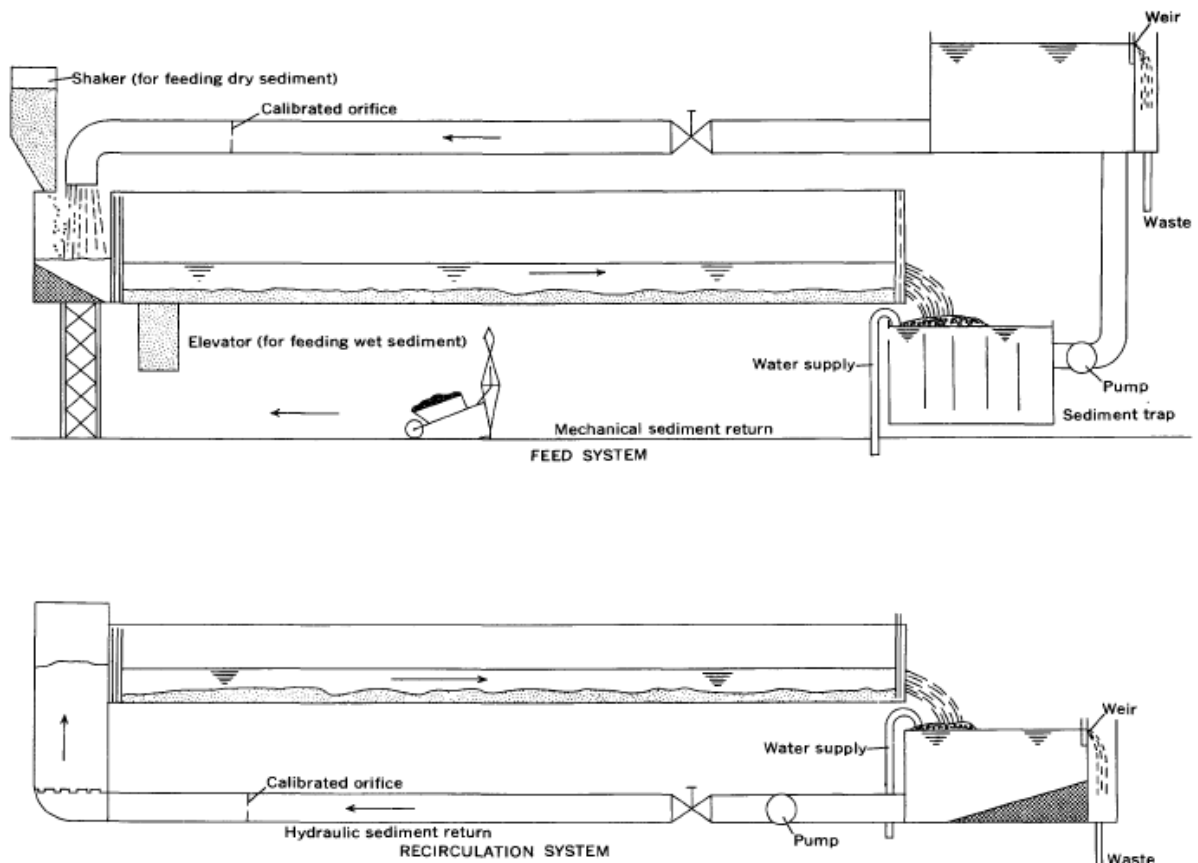


Figura 1: Sistemas de recirculación de sólidos en los equipos experimentales (Rathbun, et al, 1969)

Con este tipo de dispositivos, se realizaron una serie de importantes estudios durante las décadas del 50 y 60, entre los más destacados se encuentran los trabajos de Barton y Lin (1955), la larga serie de experimentos realizados por Simons y Richardson, el

trabajo de Brooks (1958), Laursen (1958), Kennedy (1961), Kennedy y Brooks (1965), Raudkivi (1967) y Vanoni y Hwang (1967), entre otros.

Uno de los más importantes, entre los anteriormente mencionados, fue la serie de ensayos realizados por Simons y Richardson entre los años 1956 y 1961 y la información recopilada se encuentra en el reporte publicado por Guy, et al (1966). La mayoría de estos ensayos se realizaron sobre un canal con recirculación de sólidos de 2.44 m de ancho por 45 m de largo, con caudales que variaron de 0 a 0.62 m³/s y la posibilidad de variar la pendiente del canal entre 0 y 1.5 %.

En estos experimentos se obtuvieron importantes series de datos a partir de las cuales se han desarrollado diversas teorías y aproximaciones empíricas a fenómenos naturales referidos a la resistencia al flujo, formas de fondo, transporte de sedimentos, etc. Los trabajos mencionados y los datos recabados se realizaron sobre canales de eje rectilíneo, y se encuentran documentados en la recopilación realizada por Brownlie (1981).

Mas actualmente Diplas (1990) realizó una serie de experimentos de laboratorio con un canal capaz de recircular sólidos, de 14.6 m de longitud y 0.53 m de ancho en donde se trazó una sección trapezoidal con un ángulo de talud de 45°, 23.8 cm de ancho de fondo y 6.5 cm de profundidad. El material aluvial componente fue arena con un d₅₀ de 0.19 mm. Se estudiaron pendientes que variaron de 1% a 0.3% y caudales de 0.2 a 0.6 l/s. En esta serie de experimentos se estudiaron diversos aspectos de la mecánica autoformante y estabilidad de cauces rectilíneos aluviales.

Otros trabajos similares (realizados sobre canales de laboratorio con geometría rectilínea y conformados con material aluviales) son los realizados por Farias (1994), Ikeda e Izumi (1996), Pilan (1998), Farias y Pilan (2000) y Pilan et al (2003).

En forma paralela a los trabajos mencionados, se encontraba en pleno desarrollo el estudio de cauces meandrosos. Con el objetivo de encontrar relaciones que predigan la migración de meandros, erosión de márgenes, distribución lateral de velocidades, etc, diversos experimentos se han realizado. Trabajos como los de Tiffany y Nelson (1939), Friedkin (1945), Ackers y Charlton (1970), Schumm y Khan (1972) han intentado modelar la evolución de los meandros en laboratorio utilizando puramente material no cohesivo. En la mayoría de ellos se observó que si el experimento era lo suficientemente largo lo que se obtiene es un cauce trenzado, y los meandros no

alcanzan su desarrollo. Parker et al (2011) describen este problema, y se pone en evidencia que sin algún material que establezca los márgenes los meandros no alcanzarán un desarrollo pleno. Lo mencionado puede observarse claramente en los experimentos realizados por Dulal y Shimizu (2009), en donde se han logrado desarrollar los meandros a raíz de la mezcla de arenas finas ($d_{50} = 0.11$ y 0.28 mm) con un material fino cohesivo, en este caso caolinita con un 99% del pasante entre 5 y 44 micrones. En forma similar Smith (1998), demuestra que es posible lograr el desarrollo de meandros de alta sinuosidad en canales experimentales de laboratorio, y la condición necesaria para alcanzar esta condición es el agregado de finos. El mismo fenómeno puede observarse en los experimentos realizados por Braudrick et al (2009). Si bien el desarrollo de diversas teorías y la aplicación de modelos numéricos para la resolución de ecuaciones y aproximación de problemas complejos, han tomado gran protagonismo en los últimos tiempos, la experimentación en canales de laboratorio es aún la técnica que permite modelar los fenómenos fluviales que ocurren en la naturaleza con mayor aproximación. Conforme a la literatura consultada y a experiencias propias, es posible decir que la experimentación de laboratorio aplicada a la hidráulica fluvial es una rama de la ciencia que se encuentra en pleno desarrollo, y los nuevos desafíos obligan a los investigadores laboratoristas a la optimización de las técnicas existentes, ya sea sobre el propio protocolo de ensayo, como también sobre los procedimientos de medición, recopilación de información y el propio análisis de datos.

Evolución de las técnicas de medición en canales de laboratorio

Los instrumentos de medición de laboratorio, están basados mayormente en dispositivos y métodos eléctricos, mecánicos y ópticos, y en los últimos años se han sumado, con muy buenos resultados, instrumentos de base acústica y térmica (Novak et al, 2010). El avance tecnológico, el desarrollo de micro chips, transistores, láseres, las nuevas técnicas de procesamiento de imágenes y video, el uso de computadoras, etc, han llevado a que los procedimientos de medición sean cada vez más eficaces, con instrumentos más precisos y exactos.

Entre las diversas variables que son deseables de medir en un experimento o modelo físico (ya sea cuando éstos son representaciones a escala de algún prototipo o cuando

simplemente se desea estudiar algún fenómeno físico), y particularmente en los modelos fluviales a fondo móvil, la topografía de lecho móvil en una de las más importantes y a partir de la cual se estudian diversos parámetros hidráulicos y morfológicos.

En este tipo de tareas es posible diferenciar dos escenarios posibles, mediciones realizadas con el modelo drenado, o mediciones bajo el flujo de agua (Novak op cit). En el caso de modelos drenados, las mediciones pueden ser puntuales, 2D y 3D. Las puntuales son aquellas en donde se releva un punto en particular del ensayo, las 2D hacen referencia al relevamiento de perfiles (longitudinales o transversales) y las 3D, a la generación de modelos digitales de elevación (MDE).

Antiguamente se utilizaban niveles ópticos o teodolitos (Vergara Sanchez, 1995) para las mediciones planialtimétricas. Actualmente esos instrumentos han sido reemplazados por distanciómetros laser en modelos reducidos, y por estación total o GPS en modelos de mayor envergadura.

En todo modelo o experimento, es deseable poder obtener un modelo digital de elevaciones del terreno. En los primeros modelos a lecho móvil esto se intentaba lograr a partir del relevamiento de las curvas de nivel. Para ello, una vez concluido el ensayo, se dejaba drenar el agua hasta un nivel deseado, se colocaba un hilo sobre la intersección de la superficie libre del agua y el borde del lecho (lo que representa la curva de nivel) y se repite el procedimiento para diversos niveles (Figura 2). Finalmente se obtenían las coordenadas xyz de diversos puntos sobre las curvas de nivel con los instrumentos anteriormente descritos.



Figura 2: Método de las curvas de nivel para relevamientos altimétricos en modelos físicos

En la actualidad, la tendencia es lograr lo que se conoce como “imágenes de profundidad” o “mapeo tridimensional”. Esto consiste en generar modelos de elevación del terreno a partir de la utilización de modernos instrumentos y la aplicación de diversas técnicas de mapeo y análisis de imágenes.

Las técnicas más utilizadas aplicadas a estos métodos son (Schwarte et al, 2000): triangulación, interferometría y “time of flight” (detección de la variación de intensidad de luz). Instrumentos como Hokuyo UXM-30 LN lasser scanner (Hokuyo, 2009) y la Mesa Imaging SwissRanger SR400 dept camera (R400, 2011) son ejemplos de las nuevas tecnologías capaces de realizar relevamientos tridimensionales.

En el otro escenario de medición planteado (mediciones bajo un flujo de agua), las posibilidades de realizar mediciones son limitadas, o al menos con instrumentos que no modifiquen las condiciones de flujo o del propio lecho.

Antiguamente, al igual que en la actualidad, uno de los métodos más utilizados para este tipo de tareas es la intrusión de algún elemento graduado (tipo regla) hasta hacer contacto con el lecho (Novak et al, 2010). Evidentemente esto genera una perturbación en los patrones de flujo, lo que podría generar un proceso de erosión local, y que dada la no linealidad de los procesos fluviales, podría modificar la evolución esperada del experimento.

Otra alternativa, para evitar los inconvenientes mencionados, es la de drenar el equipo experimental en el instante de tiempo donde se pretende relevar la topografía del lecho. Una vez realizadas las mediciones, se vuelve al caudal de ensayo y se repite el procedimiento en otro instante de tiempo (Pilán et al 2003). Si bien esta metodología sería de carácter no intrusivo, el flujo inestacionario que se genera al drenar y volver al régimen de ensayo, tampoco asegura la esperada evolución del experimento.

Una técnica no intrusiva es la propuesta por Wells et. al (2013), donde a través del análisis de imágenes es posible obtener la evolución temporal del ancho superficial de un canal en laboratorio, la desventaja de este procedimiento es que no entrega información de la batimetría del cauce. Actualmente no se conocen técnicas que permitan medir topografías en canales de laboratorio que sean no intrusivas, o al menos no a un costo razonable. Mankoff y Russo (2012) han visto que es posible medir a través del agua con un sensor de movimiento (Figura 3), y sugieren que sería posible realizar mediciones de calidad previa corrección de los resultados obtenidos.

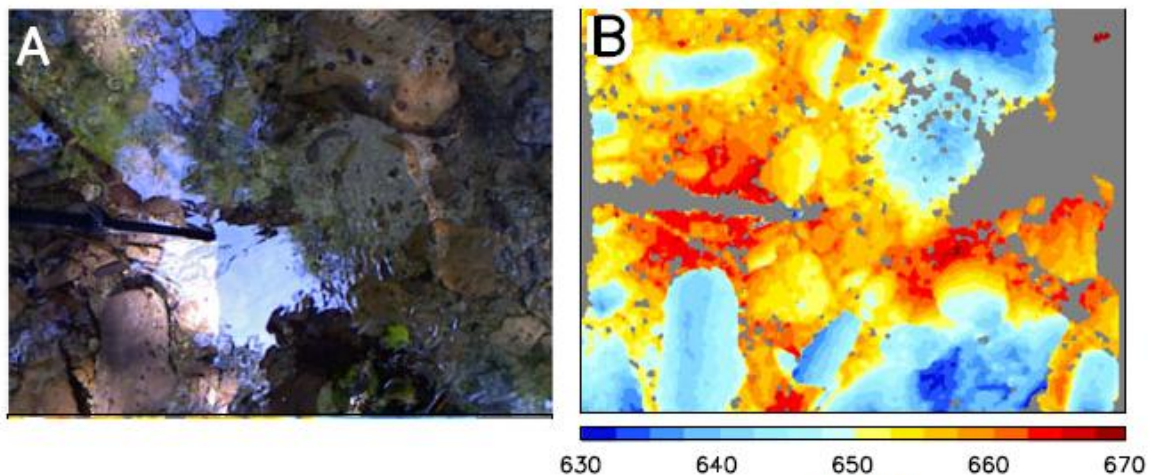


Figura 3: Imagen RGB de la batimetría de un cauce natural (A), Información batimétrica obtenida con un sensor de movimiento (B). (Mankoff et al., 2012)

Sensores de Movimiento

Los sensores de movimiento son así denominados debido al origen de su desarrollo, la interacción natural en videos juegos (seguimiento y detección del cuerpo a través del análisis de imágenes RGB y de profundidad). Los dos equipos comercialmente más divulgados son el sensor Microsoft Kinect, lanzado al mercado en el año 2010 y la XtionPro Live de ASUS presentada un año más tarde. Si bien estos equipos son comercializados por dos empresas distintas, el hardware de ambos dispositivos es el mismo, y fue desarrollado por la compañía israelí PrimeSense Ltd (PrimeSense 2011). Estos sensores han capturado la atención de investigadores en diversos campos de la ciencia. Trabajos como los publicados por Andrew (2010), Chang et al. (2011), Stowers et al. (2011), Herbst et al. (2011), Menna et al. (2011), entre otros, son claros ejemplos de lo mencionado, y se encuentran entre los primeros desarrollos de aplicación de los sensores de movimiento. Dado el bajo costo de estos equipos y la versatilidad de los mismos en cuanto a la captura y manipulación de información, es que se les atribuye un gran potencial en el mapeo tridimensional a puertas adentro (Henry et al, 2014). También son capaces de obtener imágenes de profundidad y de color (RGB) simultáneamente, con una velocidad de captura de hasta 30 cuadros por segundo (o por sus siglas en inglés, 30 fps), con más de 300.000 puntos cada una de ellas. Los inventores (Freedman et al, 2010) describen la medición de la profundidad como un proceso de triangulación.

Desde el lanzamiento de estos equipos, gran cantidad de investigadores se han dedicado al análisis de la información capturada ya que previo a su aparición no existían instrumentos de medición con el mismo principio de captura. Investigación geométrica y calibración de sensores similares, como el SwissRanger, han sido motivo de numerosas publicaciones (Breuer et al., 2007, Kahlmann e Ingensand, 2008; Lichti, 2008), pero tal como ya se ha mencionado el principio de medición es distinto.

Khoshelham (2011) publica uno de los primeros trabajos referidos a la calidad de la información de profundidad obtenida por estos sensores de movimiento, y logra cuantificar la variación de error aleatorio de medición. En el mismo año Herrera et al (2011) presentan un algoritmo que permite calibrar simultáneamente las cámaras RGB y de profundidad logrando de esta manera colapsar ambas imágenes y que se correspondan pixel a pixel. Chow et al. (2012) realizan un completo análisis de diversos factores que pudieran influenciar la calidad de las mediciones como tiempo de precalentamiento del equipo, ángulo de incidencia, humedad y temperatura del ambiente, etc. Otros trabajos similares fueron publicados por Khoshelham y Elberink (2012), Yamazoe et al (2012), Smisek et al (2013) y Galna et al (2014).

Tal como se observa hasta aquí, existe gran potencial en el uso y las aplicaciones de estos instrumentos. Conforme a la literatura consultada, es posible decir que gran parte de los avances y desarrollos científicos presentados corresponden al área de la robótica y la visión computacional. Los primeros en introducir los sensores de movimiento al estudio de las Ciencias de la Tierra, fueron Mankoff y Russo (2012). En esta publicación los autores realizan una detallada descripción del hardware y software utilizado, un análisis de la precisión y calidad de la información recolectada y las limitaciones existentes. Finalmente presentan una serie de experimentos aplicados en el estudio de glaciares, mediciones batimétricas de corrientes naturales (Figura 3) y geomorfología de un lecho de arena.

Dalla Mura et al. (2012) presentan los resultados preliminares en la utilización de la Microsoft Kinect aplicada a la geomorfología fluvial. Los autores utilizan la información RGB y de profundidad (previamente calibradas) para la determinación de los tamaños de sedimentos y curvas granulométricas en cauces aluviales (Figura 4).

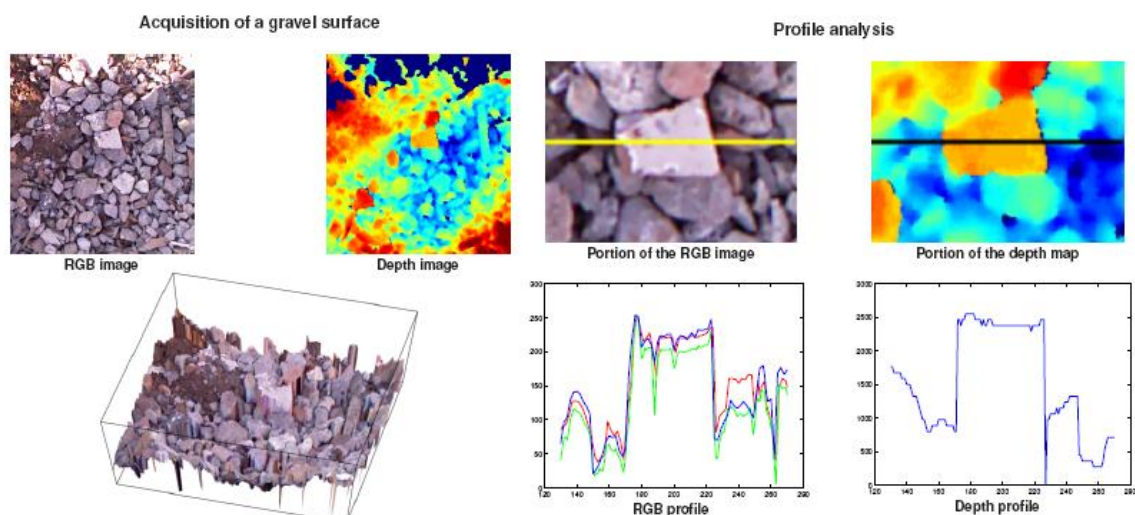


Figura 4: Utilización de la Microsoft Kinect para la determinación del tamaño de sedimento en cauces aluviales. (Dalla Mura, 2012)

Hammerle et al (2014) compararon las mediciones realizadas con un sensor de movimiento y un escaner laser terrestre (tecnología LIDAR) en una caverna ubicada en Alemania. Finalmente los autores concluyen que en base a las diferencias existentes, la facilidad de transporte del sensor de movimiento, su bajo costo y rango de aplicación, estos equipos tienen un alto potencial en estos estudios.

Finalmente el último artículo consultado referente a la aplicación de los sensores de movimiento a las Ciencias de la Tierra es el publicado por Rincón et al (2015) donde utilizan el instrumento para la detección de deformaciones en modelos morfoestructurales de volcanes.

Tal como se observa en la literatura consultada, la utilización de sensores de profundidad en investigaciones referidas a las Ciencias de la Tierra, ha ido tomado relevancia, y en base a los resultados obtenidos por otros autores, es posible decir que los mismos tienen un gran potencial para este tipo de aplicaciones dado su bajo costo, alta resolución 3D, velocidad de captura y facilidad de transporte, y calidad de la información recolectada.

Objetivos Generales y Específicos

- a- Poner a punto y en marcha el canal experimental que se dispone en el Laboratorio de Hidráulica de la Universidad Tecnológica Nacional, Regional Córdoba. Reproducir ensayos conocidos en la literatura y comparar los resultados a los fines de evaluar su funcionamiento.

- b- Estudiar la calidad de las mediciones de un distanciómetro láser (sistema tradicional de medición en laboratorio) sobre el material componente de canal experimental, con el fin de adoptarlo como instrumento patrón o de comparación.
- c- Estudiar y analizar la información obtenida sobre mediciones realizadas con un sensor de movimiento en superficies secas, y determinar su potencial uso como sistema de medición en el equipo experimental mencionado.
- d- Desarrollar una técnica que permita realizar relevamientos de calidad con el sensor de movimiento en grandes superficies (a escala de laboratorio).
- e- Evaluar la capacidad de medición de estos sensores a través del agua y desarrollar una técnica que permita realizar mediciones en forma automática sobre un sector del canal sin interrumpir el ensayo (mediciones evolutivas).

Producción científica, becas y proyectos relacionados al presente trabajo

Es importante destacar que el presente trabajo se realizó en el marco del proyecto de investigación UTN – 1653, disposición SECyT 63/12, “Caracterización Experimental y Modelación Numérica del Proceso de Erosión General en Cauces Arenosos con Curvas”, en el Laboratorio de Hidráulica de la Facultad Regional Córdoba, Universidad Tecnológica Nacional.

El financiamiento de la carrera de maestría se realizó a través del Programa de Becas Bicentenario de Investigación y Posgrado de la Universidad Tecnológica Nacional, convocatoria 2011, la cual me fue otorgada en el año 2011 con el primer orden de mérito (Resolución UTN Nº 1415/2011).

Fueron producto de esta tesis los artículos que a continuación se numeran:

- **Bupo M.**, Weber J. F., (2013) “Puesta a Punto del Canal Experimental a Fondo Móvil de Pendiente Variable en el Laboratorio de Hidráulica de la UTN-FRC”, UTN-FRC. XXIV Congreso Nacional del Agua. San Juan. 14 al 18 octubre.
- **Bupo M.**, Weber J.F., (2013) “Consideraciones sobre el uso de sensores de movimiento para la medición de microtopografías en canales de erosión”, UTN-FRC. Sexto Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos, Ríos 2013. FICH-UNL, Santa Fe, 06 al 08 de noviembre de 2013.

- **Bupo M.,** Weber J.F., (2014) “Mediciones de micro-topografías en canales de erosión con un sensor de movimiento”, UTN-FRC. II Encuentro de Investigadores en Formación, IFRH 2014. INA, Buenos Aires, 09 al 10 de Octubre 2014.
- **Bupo M.,** Weber J.F., (2015) “Metodología para la medición de Microtopografías en canales de laboratorio con un sensor de movimiento”, UTN-FRC. IV Simposio de Métodos Experimentales en Hidráulica, Buenos Aires, 18 al 20 de marzo 2015
- **Bupo M.,** Weber J.F., (2015) “Avances en el desarrollo de una técnica para medir la evolución del lecho en canales de laboratorio con un sensor de movimiento”, . XXV Congreso Nacional del Agua. Paraná, Entre Ríos. 15 al 19 de Junio del 2015.
- **Bupo M.,** Weber J.F., (2015) “Medición de la evolución temporal de un cauce aluvial en canales de laboratorio con un sensor de movimiento”, VII Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos, Ríos 2015, Montevideo, Uruguay, 4 al 6 de noviembre de 2015.

También fue resultado del presente trabajo la publicación de un artículo en la revista Acua – LAC: del Programa Hidrológico Internacional para América Latina y el Caribe, cuya referencia se observa a continuación.

- **Bupo M.,** Weber J. F., (2016). “Medición de la evolución temporal de un cauce aluvial en canales de laboratorio con un sensor de movimiento”. Aqua-LAC: revista del Programa Hidrológico Internacional para América Latina y el Caribe, 8(1), 1-9.

Cabe mencionar que se encuentra en proceso final de revisión un artículo en la Revista Iberoamericana del Agua (RIBAGUA) titulado “Metodología para la medición de micro topografías en canales de laboratorio con un sensor de movimiento” (Ref. RIBA-D-15-00009R1).

CAPÍTULO 2

Materiales y Métodos

Canal experimental. Desarrollo y Características

Durante los años 2008-2009, se incorporó al Laboratorio de Hidráulica de la Facultad Regional Córdoba, Universidad Tecnológica Nacional (LH) un canal experimental con el objeto modelar procesos de erosión, transporte y sedimentación (Figura 5).

El equipamiento fue íntegramente construido por una metalúrgica local y financiado por la Secretaría de Ciencia y Tecnología de la U.T.N. a través del Concurso de Equipamiento 2010. (UTN 2010).

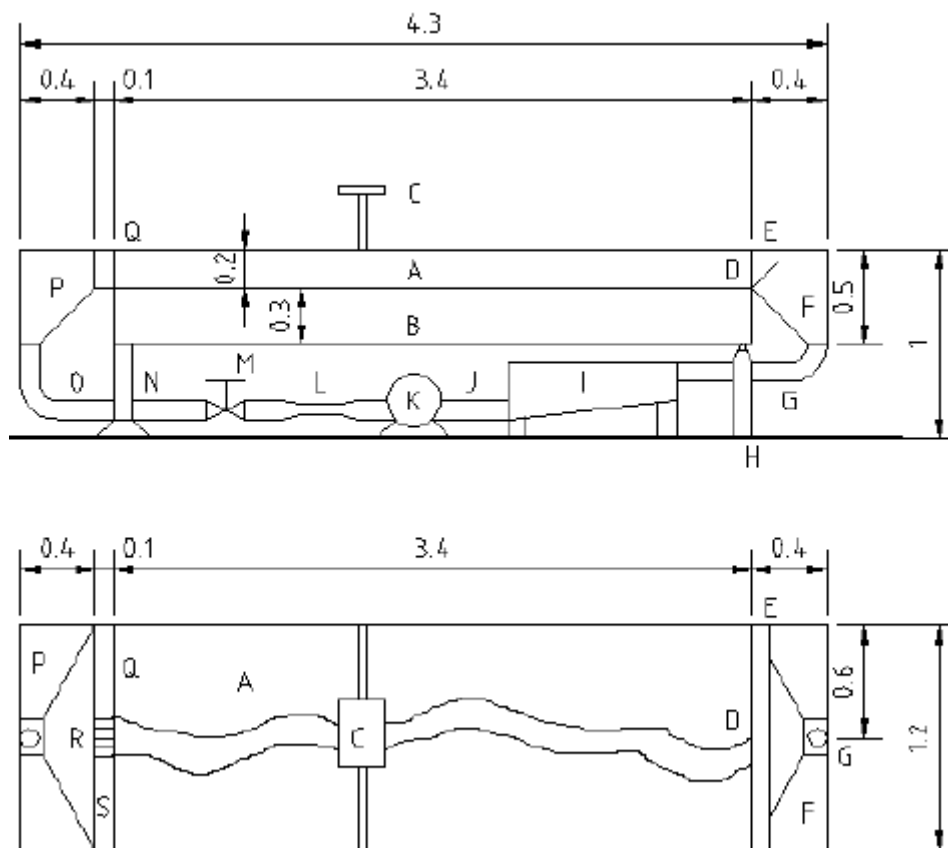


Figura 5: Arreglo Diseño original del canal experimental – dimensiones en metros (Weber y Bupo, 2013)

Las partes componentes del canal se numeran a continuación:

- A- Canal (cuerpo del equipo experimental)
- B- Lecho de arena

- C- Sistema de medición microtopográfica. Incluye carro de desplazamiento, sistema de adquisición de imágenes, reglas longitudinal y transversal para determinación de coordenadas.
- D- Plantilla de salida. Construida con policarbonato. Define la sección a la salida. Conformada por varias partes removibles, de modo de poder modificar la sección de salida en un amplio rango de posibilidades. Incluye sistema de estanqueidad.
- E- Compuerta de regulación de nivel de restitución. Incluye manija con varilla roscada para su movimiento y peines laterales (de goma) para estanqueidad.
- F- Tolva de descarga. De chapa. Los taludes evitan la deposición masiva de sedimentos.
- G- Tubería de descarga de P.V.C, de 110 mm de diámetro.
- H- Apoyos fijos. Permiten al canal bascular sobre ellos.
- I- Cisterna de chapa con fondo taluzado para facilitar el movimiento de sólidos.
- J- Tubería de aspiración de la bomba.
- K- 2 Bombas centrífugas. 10.5 l/s de capacidad de bombeo.
- L- Tubo Venturi calibrado para medir caudales. Este fue reemplazado por un sistema de medición volumétrico, el cual se detallará en los párrafos siguientes.
- M- Válvula tipo mariposa para la regulación de caudales.
- N- Apoyos móviles para la modificación de la pendiente general del canal.
- O- Cañería de impulsión.
- P- Tolva de carga. Similar a F, con un sistema disipador de energía.
- Q- Plantilla de entrada. Iguales características que D.
- R- Sistema encauzador de flujo, construido con placas de policarbonato huecas.
- S- Paneles de relleno que impiden la acumulación de sedimentos.

Tal como se observa en la Figura 5, el equipo tiene un largo total de 4,30 m y un ancho de 1,20 m, y el área efectiva de estudio es de 3,40 x 1,20 m, ya que los sistemas de ingreso y egreso del canal deben descontarse de la longitud total. En dicho espacio se pretenden estudiar procesos unidimensionales y bidimensionales de pequeña escala.

El canal cuenta con un carro desplazable con dos grados de libertad, montado sobre rieles laterales, ideado para alojar diversos instrumentos de medición. A este carro se le instaló un sistema que permite realizar la nivelación del material del canal, y a su

vez, es posible adosarle distintas secciones (gálidos) para la construcción de la geometría inicial de canales rectilíneos (Figura 6).



Figura 6: Carro desplazable

Una de las principales características es la posibilidad de variar la pendiente. El canal dispone de dos puntos de apoyo, uno de ellos tiene la capacidad de ser regulado en altura, a través de un gato hidráulico y un sistema de varillas roscadas, y el otro dispone de un eje de rotación, que complementado con una nivelación óptica, permiten regular la pendiente del equipo experimental.

En la parte inferior, y semienterrada, se encuentra una cisterna con una capacidad de 1030 ltrs. (Figura 7), y la misma es la encargada de albergar el volumen necesario para que el sistema entre en régimen. Dentro de la cisterna se encuentran dos bombas sumergibles de 1,5 Hp, aptas para la recirculación de sólidos, las cuales tienen una capacidad de bombeo en forma conjunta de 8 l/s, bajo las condiciones actuales de instalación.



Figura 7: Cisterna semi-enterrada

Los sistemas de entrada y salida del área efectiva del equipo experimental se materializaron con tolvas metálicas. Las mismas se diseñaron con geometría piramidal,

lo que facilita la recirculación de sedimentos (Figura 8). La que se encuentra al ingreso del canal se comunica a la cañería de impulsión de las bombas centrífugas, que bajo las condiciones de caudal máximo, genera velocidades del orden de 5 m/s, lo cual es inadmisibles para los tipos de ensayos que se pretenden realizar.

Esta problemática fue resuelta con el diseño de un dissipador de energía, el cual debe cumplir con dos claros objetivos: generar una pérdida de carga tal que las velocidades no excedan los parámetros deseados, y por otro lado que permita la correcta recirculación de sedimentos. El dissipador mencionado se logró a través de un gavión de rocas con granulometría variable, tal que se cumplen las condiciones mencionadas (Figura 8).

En la tolva de salida del canal, se aloja una compuerta de restitución regulable en inclinación entre los 25° y 48°, permitiendo de esta manera regular la condición de aguas abajo del experimento (Figura 9).



Figura 8: Tolva de ingreso y egreso a la izquierda, dissipador de energía a la derecha.

Con el objeto de evitar corrientes preferenciales de flujo, e incluso poder regular la dirección de la entrada del flujo, se diseñaron unos encauzadores de flujo los cuales se disponen a la salida de la tolva de ingreso y a la entrada de la de egreso (Figura 9). Los mismos se realizaron de policarbonato, lo que permite regular el alto y ancho de los mismos.

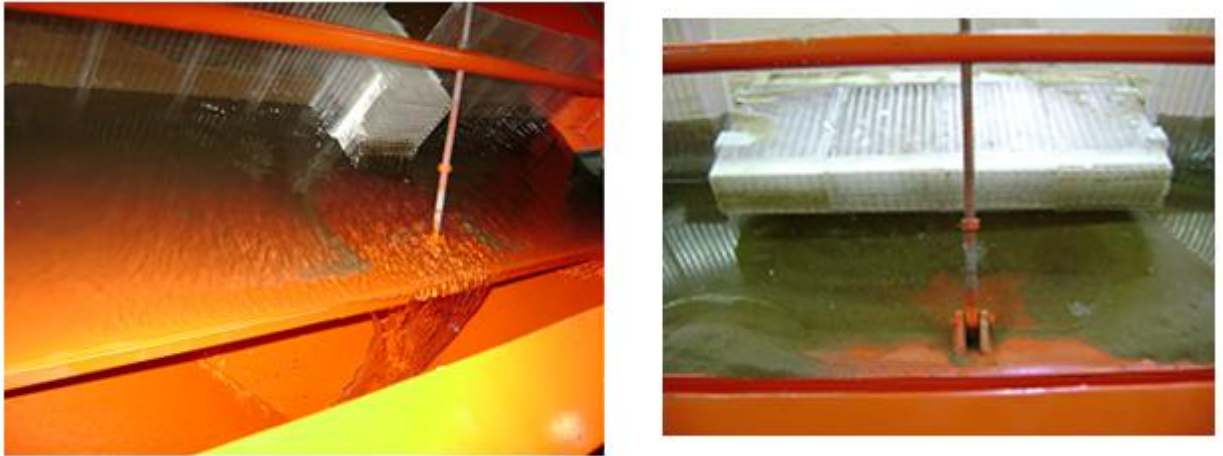


Figura 9: Compuerta de restitución a la izquierda, encauzador de flujo a la derecha

Caracterización del Material Aluvial Componente

Análisis Granulométrico

El canal experimental se rellenó con un material aluvial (sin cohesión) conocido comercialmente como Arena Paraná, nombre que recibe dado al origen del mismo.

Las fórmulas empíricas y los desarrollos teóricos (principalmente en los procesos de resistencia al flujo) involucran como parámetro algún diámetro característico del material. El análisis de la distribución por tamaños de las partículas que componen un agregado, se denomina análisis granulométrico.

Dicho análisis consiste en la creación de una curva la cual tiene en ordenadas el porcentaje de material pasante por una determinada abertura de malla y en abscisas el diámetro correspondiente a dicha abertura. Se ensayaron 5 muestras tomadas aleatoriamente de la mesa de arena; el procedimiento utilizado para la determinación de la curva granulométrica se encuentra descrito en detalle por la norma IRAM 1505:2005 “Agregados. Análisis Granulométrico” G9 a G11: Agregado Fino, y los ensayos se realizaron en el laboratorio de Geotecnia de la Facultad Regional Córdoba, Universidad Tecnológica Nacional. La curva granulométrica queda conformada por el promedio de las 5 muestras ensayadas, y realizando una interpolación de los resultados, se calcula uno de los diámetros característicos más utilizados que es el d_{50} y su valor es de 0.296 mm. Los resultados se encuentran en la Tabla 1 y la representación gráfica de la curva promedio puede observarse en la Figura 10.

Tabla 1: Resultados de los ensayos realizados sobre las 5 muestras de arena

CURVAS GRANULOMÉTRICAS							
Tamiz (Nº)	Tamiz (mm)	Retenido (% Acumulados)					Promedio
		M1 (gr)	M2 (gr)	M3 (gr)	M4 (gr)	M5 (gr)	
4	4.776	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
10	2	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
20	0.84	1.02%	0.97%	0.94%	0.75%	0.92%	0.92%
30	0.59	3.37%	2.85%	3.30%	2.46%	2.70%	2.94%
40	0.42	13.71%	12.01%	14.91%	12.97%	17.52%	14.23%
60	0.25	50.15%	53.36%	64.64%	72.38%	74.90%	63.09%
100	0.149	98.07%	98.73%	99.10%	98.91%	98.90%	98.74%
200	0.074	99.58%	99.72%	99.80%	99.78%	99.70%	99.71%
Pasante 200		100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%

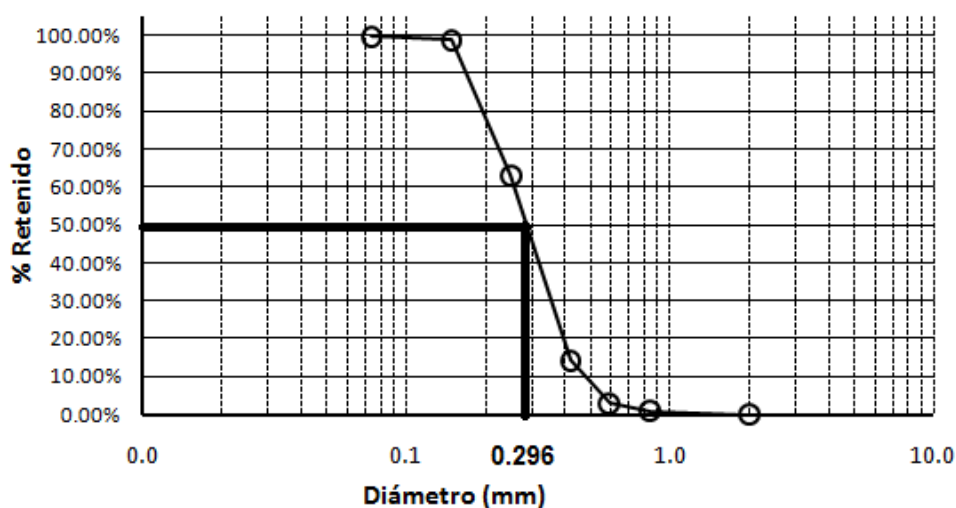


Figura 10: Curva granulométrica del material aluvial componente del canal experimental

Determinación de la Gravedad Específica

Este es un parámetro muy utilizado en la hidráulica fluvial, y en general se asume un valor de 2.65, ya que los materiales de origen aluvial responden a esa cantidad.

Para la determinación de la gravedad específica se utilizó el procedimiento descrito en la norma ASTM D854 – 06, en donde se define a este parámetro como la relación entre el peso de un determinado volumen de partículas de suelo (W_d) y el peso de un volumen igual de agua destilada a 4º C (W_w), o también como la relación del peso unitario de los granos del suelo γ_s , y el peso unitario del agua destilada a 4º C γ_w (Ecuación 1 y 2).

$$G_s = \frac{W_d}{W_w} \quad [1]$$

$$G_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_w} \quad [2]$$

Los ensayos se realizaron sobre las mismas 5 muestras a partir de las cuales se determinó la curva granulométrica. Los resultados se aprecian en la Tabla 2, y tal como se esperaba, el resultado promedio no ha variado en demasía del habitualmente utilizado.

Si bien la diferencia entre el valor habitualmente impuesto (2.65) y el obtenido (2.613) es menor al 1.5%, para los cálculos que se realicen se utilizará el valor determinado en laboratorio.

Tabla 2: Resultados de los ensayos para la determinación de la Gravedad específica

GRAVEDAD ESPECÍFICA					
Muestras					
	1	2	3	4	5
Peso Matraz (Wm) (gr)	51.09	51.13	51.14	51.09	51.23
Peso matraz mas suelo (Wmd) (gr)	84.15	79.69	79.65	81.99	83.35
Peso matraz mas suelo mas agua (Wmdw) (gr)	171.28	168.42	168.38	169.99	170.46
Peso matraz mas agua (Wmw) (gr)	150.76	151.07	150.76	150.82	150.49
Temperatura b(º C)	20	20	20	20	20
Factor de Corrección	0.9988	0.9988	0.9988	0.9988	0.9988
G _s	2.633	2.545	2.615	2.631	2.640
G_s Promedio	2.613				

Determinación del ángulo de fricción interna

El ángulo de rozamiento tiene una interpretación física sencilla, al estar relacionado con el ángulo de reposo o máximo ángulo posible para la pendiente de un cono de dicho material granular (Figura 11). En un material granular cualquiera el ángulo de reposo está determinado por la fricción, la cohesión y la forma de las partículas, pero en un material sin cohesión y donde las partículas son muy pequeñas en relación al tamaño del cono el ángulo de reposo coincide con el ángulo de rozamiento interno.

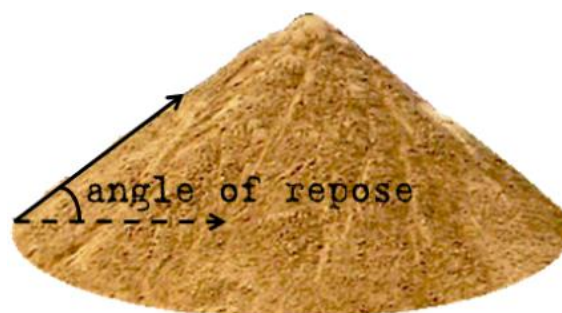


Figura 11: Cono de arena

La determinación de este parámetro se realizó en forma indirecta, a través del cálculo del ángulo de inclinación de los taludes de un cono autoconformado de la arena componente del canal experimental.

Se realizaron tres ensayos, todos sobre un recipiente prismático, dos en condiciones naturales del material (Ensayo N° 1 y N° 2), y otro en condiciones de saturación (sumergido, Ensayo N° 3). En todos los casos el ensayo consiste en verter arena sobre el recipiente de manera que se genere el cono, luego de un determinado tiempo se miden las distancias correspondientes al ensayo, X_1 y X_2 o H_1 y H_2 (Figura 12). Repitiendo esta secuencia para varios instantes del vertido y realizando los cálculos trigonométricos (Ecuaciones 3 y 4) se obtiene el ángulo de fricción interna (θ).

$$\theta = \tan^{-1} \frac{H}{X_2 - X_1} \quad [3]$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{H_2 - H_1}{X} \quad [4]$$

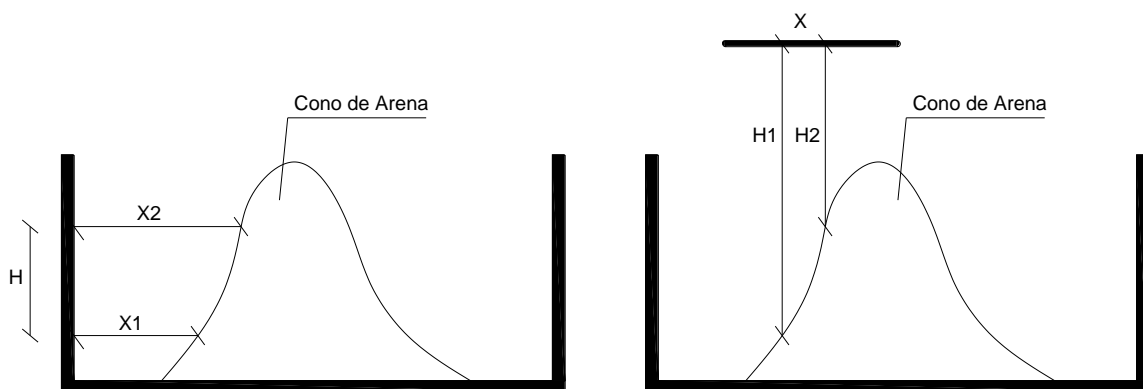


Figura 12: a la izquierda el esquema utilizado para el ensayo N° 1 y el sumergido, a la derecha el correspondiente al ensayo N° 2.

En base a más de 70 mediciones realizadas, fue posible determinar las medias de los ángulos obtenidos (Tabla 3). En la Figura 13 se observa un gráfico de caja construido a partir de los datos medidos, donde se condensa la información obtenida experimentalmente la cual se encuentra disponible en el ANEXO I.

Tabla 3: Valores obtenidos del ángulo de fricción interna del material componente del canal experimental

Angulo de Fricción Interna	
ENSAYO N° 1	32.2 °
ENSAYO N° 2	32.67 °
ENSAYO SUMERGIDO	30.53 °

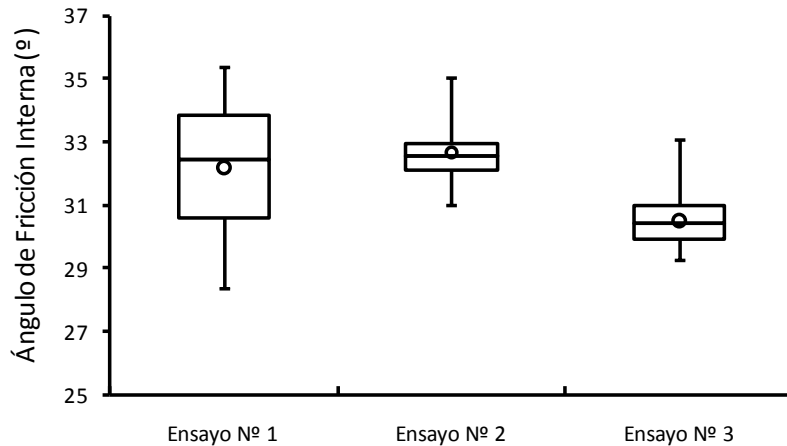


Figura 13: se observan los gráficos de caja realizados para los tres ensayos. A la izquierda para las mediciones realizadas con el primer esquema de experimentación, al centro las correspondientes al segundo esquema, y a la derecha las mediciones sobre arena sumergida

Sistema de medición y regulación de caudales líquidos

La medición de caudales líquidos se hace de dos formas, dependiendo del rango en el cual se esté trabajando. Por debajo de los 3 l/s, se realiza volumétricamente a través de una descarga que se encuentra antes del ingreso a la cisterna, por encima de este valor se instaló sobre la cañería de impulsión un medidor volumétrico con una apreciación de 0.01 m³ (Figura 14).



Figura 14: Sistema de medición de caudales líquidos

Como órgano de control del caudal, el canal fue provisto, sobre la cañería de impulsión de acero, con una válvula mariposa de 9 puntos, en serie con el medidor volumétrico antes mencionado. Se observó una escasa sensibilidad a caudales bajos (menores a 3 l/s) por lo que se decidió colocar en paralelo una válvula esclusa de menor diámetro. Para ambas válvulas se determinó la relación que existe entre el grado de apertura y el caudal erogado. En el caso de la válvula mariposa, se determinó el funcionamiento de

la misma con una y dos bombas en funcionamiento. Las curvas mencionadas se observan en la Figura 15 y Figura 16.

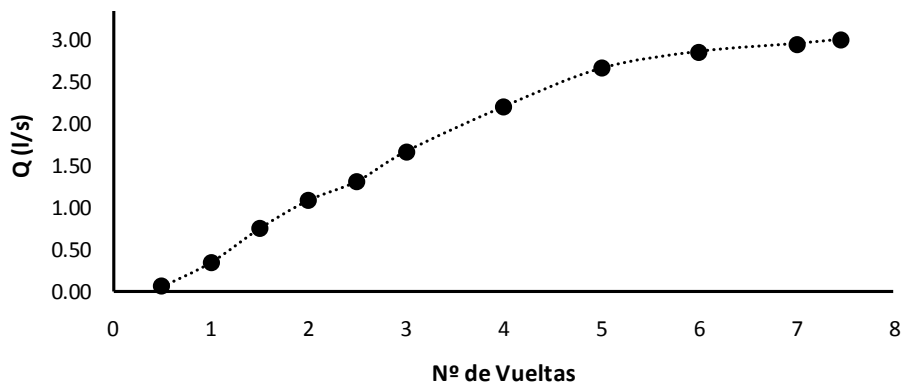


Figura 15: Curva de funcionamiento – Válvula esclusa

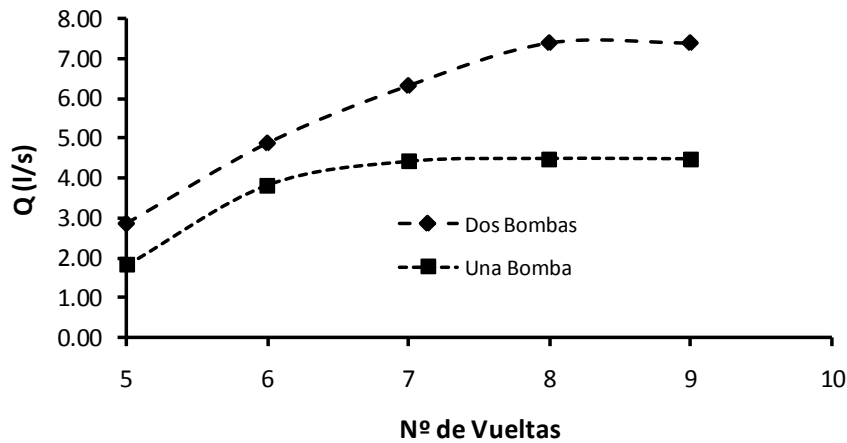


Figura 16: curva de funcionamiento – válvula mariposa

Sistema de medición de caudales sólidos

Para la estimación de caudales sólidos, se diseñó un filtro que se interpone entre la descarga del canal y la cisterna (Figura 17), de manera que en él se retiene el sedimento transportado por el flujo de agua.

Para construcción del filtro mencionado, se tomaron como condición de diseño las siguientes características: alta permeabilidad, poca deformabilidad y una sección menor al d_{95} . Se encontró un material (tejido sintético de lycra) que cumple con la mayoría de las condiciones mencionadas, con el inconveniente de que cuando se lo somete a las condiciones de operación (velocidades de impacto de agua del orden de los 2.5 m/s) el mismo se deforma, aumentando la sección de paso y por ende perdiendo eficiencia.



Figura 17: medidor de caudal sólido

Para salvar este inconveniente se decidió complementar este material con otro de mayor rigidez (malla metálica), y para ello se ensayaron tres configuraciones de filtro (Figura 18) bajo las condiciones de operación.

DISEÑO 1	DISEÑO 2	DISEÑO 3
Filtro _____	Filtro _____	Filtro _____
Malla _____	Filtro _____	Malla _____
	Malla _____	Filtro _____
		Malla _____

Figura 18: configuraciones de filtros ensayadas

En todos los casos se obtuvo una eficiencia en la retención de los sedimentos mayor al 98 %, y la configuración N° 2 es la que finalmente se selecciona para la construcción definitiva del filtro. Los resultados de las mediciones se observan en la Tabla 4.

Tabla 4: Resultados de los ensayos realizados para la selección de la configuración del filtro

ENSAYO SOBRE FILTRO DISEÑADOS							
	Ensayo	Peso Filtro Antes del Ensayo	Peso de la Muestra	Peso Filtro + Retenido Seco	Peso del Filtro a 7 días	Eficiencia	Eficiencia Media
Filtro Tipo 1	1	44	400	439	44	98.75%	98.05%
	2	45	400	426	44	95.50%	
	3	44	400	441	44	99.25%	
	4	45	400	437	44	98.25%	
	5	44	400	438	44	98.50%	
Filtro Tipo 2	1	65	400	463	66	99.25%	99.50%
	2	66	400	463	67	99.00%	
	3	66	400	466	66	100.00%	
	4	66	400	463	65	99.50%	
	5	66	400	464	65	99.75%	
Filtro Tipo 3	1	83	400	477	84	98.25%	99.45%
	2	84	400	483	85	99.50%	
	3	85	400	485	85	100.00%	
	4	85	400	484	86	99.50%	
	5	85	400	485	85	100.00%	

Distanciómetro laser. Análisis de precisión e incertidumbres

El equipo de medición con el cual se realizaron las mediciones de control, y para la puesta a punto del equipo experimental fue un distanciómetro laser BOSCH DEL 70 Professional (Figura 19).



Figura 19: Distanciómetro Laser BOSCH DEL 70 Professional

Este equipo tiene dos virtudes, una es la de realizar mediciones no intrusivas sobre la superficie a relevar y la segunda es la alta confiabilidad de los resultados. El instrumento se montó sobre el carro deslizante que posee el canal experimental (Figura 6), a partir del cual es posible realizar mediciones tridimensionales de la superficie. Las características técnicas del equipo son las que se muestran en la Tabla 5.

La calidad de las mediciones de estos instrumentos es bien conocida en el ámbito para el cual fue creado (relevamientos de obras de arquitectura), dado que en el presente estudio se pretenden medir superficies de arena con distintos grados de humedad y diversos ángulos de incidencia, es que se decidió realizar un análisis de precisión e incertidumbres.

Tabla 5: Características técnicas del distanciómetro laser

Características técnicas	
Suministro de serie	4 Pilas de 1,5 V (AAA), Correa de transporte, estuche protector
Alcance	0,05–70 m
Exactitud de medida	$\pm 1,0$ mm
Prot. contra polvo y salpic. de agua	IP 54
Medidas (L/An/Al)	100 x 59 x 32 mm
Peso	0,18 kg

Se realizaron mediciones sobre cuatro tipos de superficies, superficie plana horizontal de madera lisa, superficie de arena fina seca ($d_{50} = 0.296 \text{ mm}$) en la cual se realizaron mediciones con distintas inclinaciones (de 0° a 30° cada 5°), superficie del mismo material que en el ensayo anterior con mayor grado de humedad también con distintas inclinaciones (de 0° a 45° cada 5°) y finalmente se repitió el primer ensayo mencionado pero con una arena gruesa con un $d_{50} = 0.90 \text{ mm}$.

Para realizar los experimentos, fue necesario construir un equipo en el cual sea posible reproducir las condiciones de medición mencionadas. El mismo es un cajón de madera dentro del cual se coloca la arena, con dos parantes y un travesaño con perforaciones, del cual se monta el distanciómetro (Figura 20)

La parte superior de los parantes se construyó con varilla roscada, de esta manera es posible nivelar el travesaño, para que al realizar las observaciones éste se encuentre perfectamente horizontal.

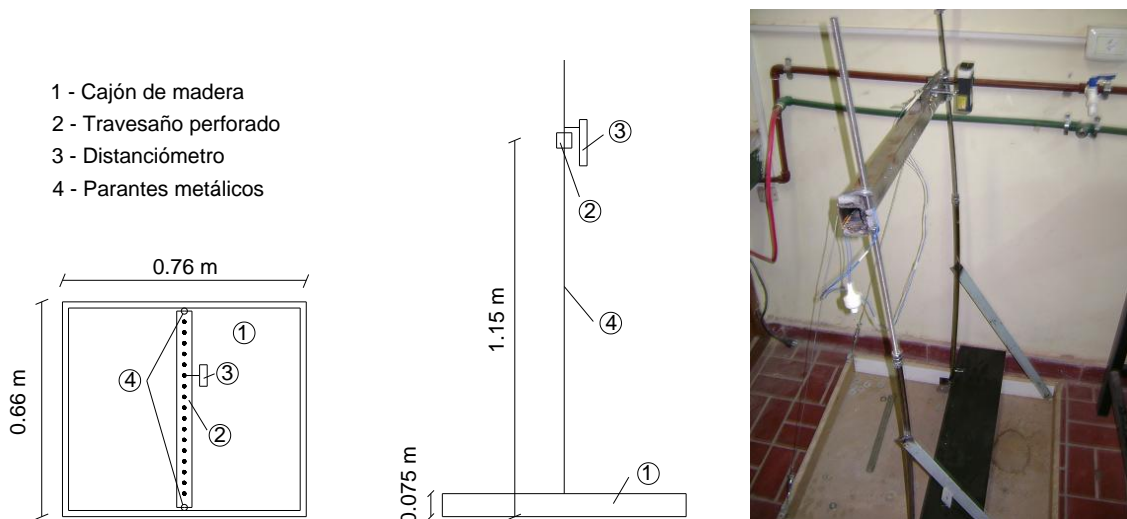


Figura 20: Esquema del equipo para realizar las mediciones sobre las distintas superficies de arena con el distanciómetro láser

Para reproducir las superficies inclinadas, se colocó una madera graduada con los ángulos de interés en uno de los lados, y del otro, una guía regulable para confinar el material granular (Figura 21).

La metodología empleada puede resumirse en la siguiente secuencia de 8 pasos:

- 1- Nivelar el travesaño superior donde se monta el distanciómetro.
- 2- Colocar el mensurando (superficie sobre la cual se realizarán las mediciones) con la inclinación deseada.

- 3- Montar el distanciómetro sobre el travesaño en una de las perforaciones del mismo.
- 4- Tomar una distancia horizontal a un punto fijo de referencia.
- 5- Conocida la distancia horizontal de referencia, se procede a tomar las distancias verticales (10 en cada coordenada X).
- 6- Se traslada el distanciómetro a una perforación vecina y se repiten los puntos 3, 4 y 5.
- 7- Cuando se ha medido en todos los puntos posibles, se procede a cambiar la inclinación de la superficie inferior, y se repiten los pasos 1 al 6.



Figura 21: Dispositivo para generar las superficies de arena con inclinación conocida, para realizar los relevamientos con distanciómetro láser

Las mediciones realizadas se organizaron en una serie de tablas, las cuales se encuentran en el ANEXO I (Tabla 14 a Tabla 34), con el objetivo de poder realizar los correspondientes análisis estadísticos. En la Tabla 6 se encuentra un ejemplo de lo mencionado, en donde la coordenada horizontal representa cada una de las posiciones del distanciómetro en el parante, y la distancia vertical es la profundidad medida con el instrumento.

Para todos los casos estudiados se calculó el residuo R como la diferencia entre la recta de mejor ajuste a la nube de puntos y el valor medido. Sobre un total de 2520 mediciones realizadas para las condiciones mencionadas se calcularon las frecuencias de estos valores, obteniendo comportamiento normal (Figura 22), lo que podría indicar que no existen errores sistemáticos en las mediciones.

Es sabido que todas las mediciones están afectadas por un error experimental proveniente del propio instrumento o de la habilidad del operador de registrar la

información. Es de esperar que a mayor número de mediciones el valor medio de las mismas se aproxime al valor verdadero, pero cuando la magnitud de los errores es menor a la sensibilidad del instrumento utilizado, el valor medido coincidirá con el valor medio en una sola medida.

De acuerdo con la teoría de Gauss de los errores, que supone que éstos se producen por causas aleatorias, se toma como mejor estimación del error, el error cuadrático, definido por la Ecuación 5.

$$\Delta x = \frac{\sigma_x}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad [5]$$

Tabla 6: mediciones realizadas sobre una superficie de arena fina húmeda a 10 °

ARENA FINA HUMEDA A 5 °												
Coord. Horizontal	424	455	483	515	546	574	606	636	664	694	724	754
Distancia Vertical (mm)	1125	1128	1130	1132	1134	1134	1136	1139	1141	1142	1142	1145
	1126	1126	1129	1132	1133	1135	1137	1138	1141	1141	1143	1145
	1125	1127	1129	1132	1133	1135	1138	1139	1141	1142	1143	1144
	1125	1127	1129	1132	1132	1136	1137	1139	1141	1142	1143	1145
	1125	1126	1129	1133	1133	1135	1137	1138	1140	1142	1142	1145
	1126	1127	1130	1133	1132	1136	1137	1139	1140	1141	1142	1145
	1125	1127	1130	1132	1133	1135	1138	1139	1140	1142	1142	1144
	1125	1126	1130	1133	1132	1135	1137	1138	1140	1142	1143	1145
	1125	1126	1130	1133	1133	1135	1137	1138	1141	1141	1143	1145
1126	1126	1129	1132	1133	1134	1137	1138	1140	1142	1144	1146	
Minimo (mm)	1125	1126	1129	1132	1132	1134	1136	1138	1140	1141	1142	1144
Máximo (mm)	1126	1128	1130	1133	1134	1136	1138	1139	1141	1142	1144	1146
Media (mm)	1125.3	1126.6	1129.5	1132.4	1132.8	1135	1137.1	1138.5	1140.5	1141.7	1142.7	1144.9
Desvio standar (mm)	0.48	0.7	0.53	0.52	0.63	0.67	0.57	0.53	0.53	0.48	0.67	0.57
error cuadrático (mm)	0.15	0.22	0.17	0.16	0.20	0.21	0.18	0.17	0.17	0.15	0.21	0.18

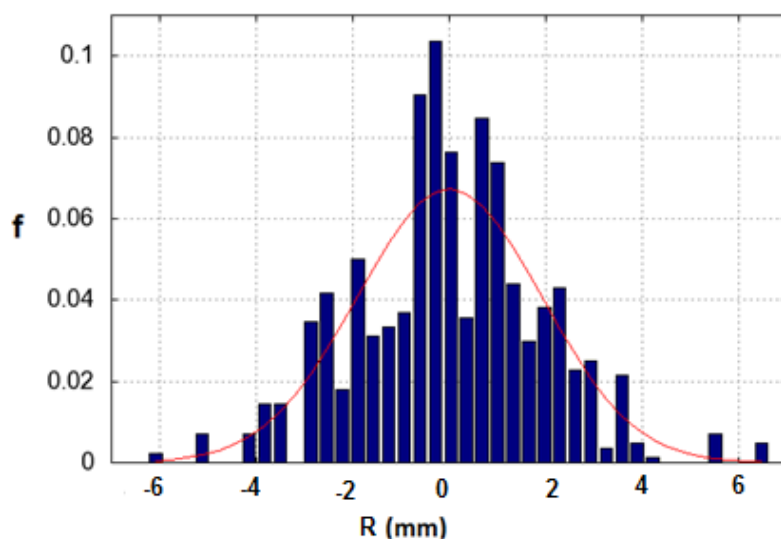


Figura 22: Distribución de frecuencias obtenido para el residuo calculado (arena fina d50 = 0.296 mm)

Se calculó el error cuadrático para las mediciones realizadas, obteniéndose que en ningún caso el mismo supera el milímetro, por lo que la calidad de las mediciones no depende de la humedad de la superficie de arena, ni del diámetro del grano dentro de los rangos estudiados. En las Figura 23, Figura 24 y Figura 25 se graficaron los valores medios del desvío estándar y error cuadrático en función de la inclinación de la superficie medida, en donde se observa claramente que en ningún caso este último supera el milímetro. Siendo la sensibilidad del instrumento utilizado de 1 mm, los resultados se expresarán como $Z \pm 1 \text{ mm}$.

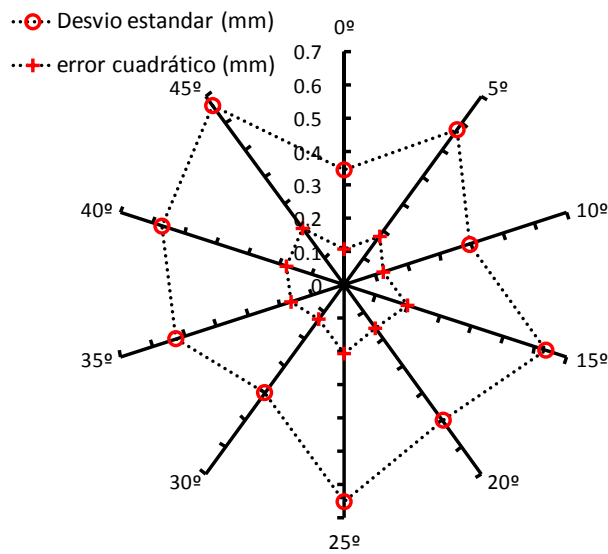


Figura 23: Valor medio del desvío estándar y el error cuadrático obtenido a partir de las mediciones realizadas sobre arena fina húmeda en función de la inclinación de la superficie relevada

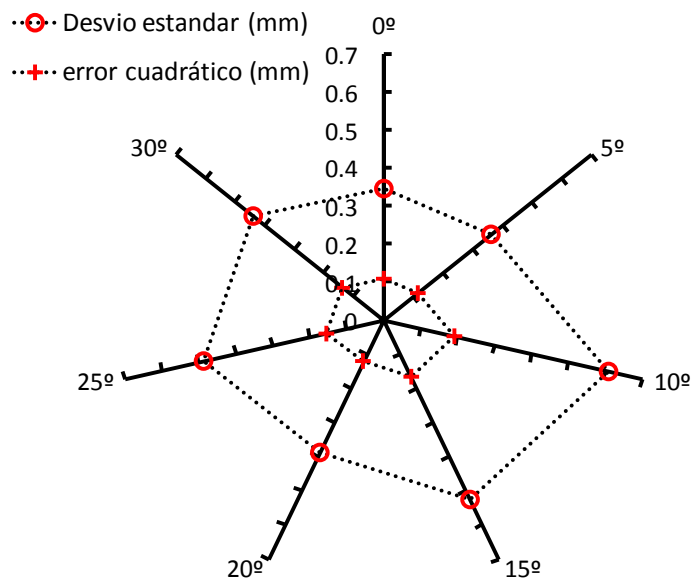


Figura 24: Valor medio del desvío estándar y el error cuadrático obtenido a partir de las mediciones realizadas sobre arena fina seca en función de la inclinación de la superficie relevada

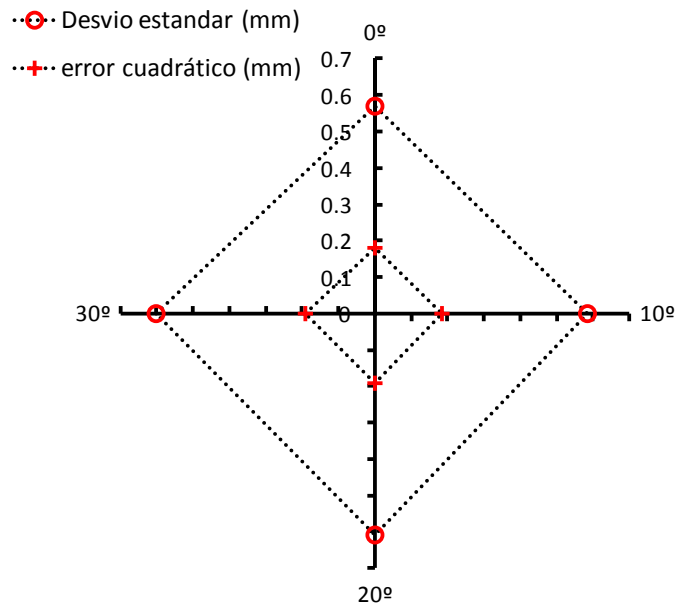


Figura 25: Valor medio del desvío estándar y el error cuadrático obtenido a partir de las mediciones realizadas sobre arena gruesa seca

Sensores de Movimiento.

Generalidades y Definiciones

Los sensores de movimiento, también conocidos como cámaras de profundidad, son equipos desarrollados para video juegos, más precisamente para la interacción natural en video juegos. El sensor comercialmente más difundido es el Microsoft Kinect, el cual se lanza al mercado en noviembre del 2010 y a partir de allí numerosas aplicaciones se han desarrollado en base a esta tecnología. Un año más tarde, se lanza al mercado la competencia desarrollada por ASUS, y su nombre comercial es XtionPro Live. Ambas cámaras de profundidad se basan en la tecnología desarrollada por PrimeSense de luz infrarroja estructurada (Soules y Wiens, 2010).



Figura 26: Microsoft Kinect a la izquierda, ASUS Xtion Pro a la derecha

Estos sensores capturan imágenes de profundidad y de color (RGB) simultáneamente con una velocidad de 30 fps (por sus siglas en inglés, cuadros por segundo). La

integración de ambas imágenes resulta en una nube de puntos a color con más de 300.000 datos.

Los equipos consisten en un emisor de laser infrarrojo, una cámara infrarroja y una RGB. Los inventores describen la medición de la profundidad como un proceso de triangulación (Freedman et al, 2010). La fuente de laser emite un haz infrarrojo el cual se divide en múltiples espectros por medio de un proceso de difracción, para crear de esa manera un patrón de puntos constante que se proyecta sobre la escena (luz estructurada infrarroja). Este patrón es capturado por la cámara infrarroja y es comparado con uno de referencia, el cual se encuentra almacenado en la memoria interna del equipo. Cuando este patrón es proyectado sobre una superficie que se encuentra a una distancia distinta a la de referencia, se generará una distorsión para cada punto del haz de rayos. Esa distorsión es medida a través de una correlación de imágenes lo que conduce a una imagen de disparidad (Figura 27).

Las imágenes se obtienen en formato binario, y la estructura del mismo varía en función de la librería que se utilice. Transformados a formato ASCII estos archivos contienen los valores de disparidad o *digital number* (DN), los cuales varían entre 0 – 2047 y vienen ordenados en un arreglo de 640 filas por 480 columnas.

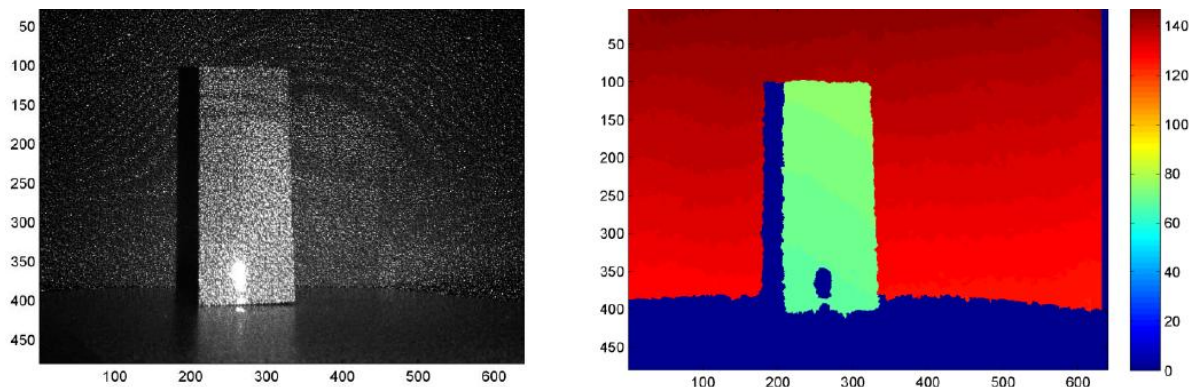


Figura 27: a la izquierda imagen infrarroja del espectro proyectado, a la derecha imagen de disparidad resultante (Khoshelham, 2011)

La Figura 28 es la representación del modelo matemático que relaciona la disparidad con la profundidad en metros.

Realizando un análisis bidimensional el espectro es emitido desde el proyector (L), al interponerse un objeto, el haz es reflejado y tomado por la cámara infrarroja con un ángulo de incidencia diferente al que tuviese si la refracción se realizase en el patrón de referencia generando de esta manera lo que se conoce como disparidad (d).

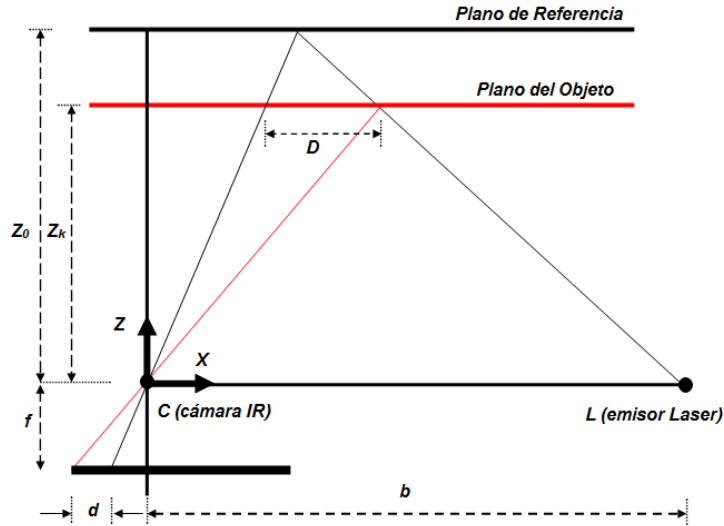


Figura 28: esquema de medición del sensor de movimiento (adaptado de Khoshelham, 2012)

Siendo c el origen del sistema de coordenadas, f la distancia focal, Z_0 la distancia al plano de referencia, Z_k la distancia que se pretende mensurar y b la distancia entre la cámara y el proyector, es posible deducir por relación de triángulos las ecuaciones 6 y 7.

$$\frac{D}{b} = \frac{Z_0 - Z_k}{Z_0} \quad [6]$$

$$\frac{d}{f} = \frac{D}{Z_k} \quad [7]$$

Trabajando algebraicamente estas ecuaciones y poniendo a Z_k en función de las demás variables se obtiene:

$$Z_k = \frac{Z_0}{1 + \frac{Z_0}{fb}d} \quad [8]$$

La ecuación (8) es básicamente el modelo matemático desde el cual se deriva la profundidad a partir de una disparidad observada.

La coordenada Z_k de un punto en forma conjunta con f , definen la escala para ese punto. Las coordenadas planimétricas de cada punto del objeto pueden ser calculadas a partir de las coordenadas de la imagen y la escala (Khoshelham y Elberink 2012).

$$X_k = \frac{Z_f}{f}(x_k - x_0 + \delta_x) \quad [9]$$

$$Y_k = \frac{Z_f}{f}(y_k - y_0 + \delta_y) \quad [10]$$

En las ecuaciones 9 y 10, x_k e y_k son las coordenadas de la imagen, las cuales se definen a partir de la ubicación del píxel en cuestión, x_0 e y_0 son las coordenadas del punto principal o al eje de medición, y δ_x y δ_y son las correcciones por distorsión de lente. Las coordenadas X_k , Y_k y Z_k se conocen como coordenadas de mundo real (Figura 29)



Figura 29: Esquema de sistema de coordenadas globales o en mundo real

Análisis de la calidad de las mediciones. Casos de Estudio

Con el objetivo de evaluar la calidad de los datos de profundidad obtenidos con estos sensores de movimiento, se realizó una serie de experimentos de medición sobre diversas superficies, geometrías y condiciones de funcionamiento.

Los experimentos se realizaron sobre planos inclinados de pendiente conocida, superficie horizontal de madera, mediciones sobre la arena componente del canal, mediciones con distintos tiempos de precalentamiento de los equipos (warm-up time) y la comparación entre las medidas obtenidas con el sensor de movimiento Kinect y Xtion-Pro realizadas sobre un mismo mensurando.

Canal rectilíneo trazado sobre arena

Sobre el canal de arena se trazó una sección trapezoidal de 5 cm de profundidad y 10 cm de fondo sobre el cual se capturaron 200 imágenes (frames). Tal como se observa en la Figura 30, las mediciones obtenidas tienen un comportamiento escalonado e irregular.

Tanto la base de la sección trapezoidal como los laterales de la misma son horizontales, por lo que conjuntamente con el comportamiento mencionado, también se observa diferencia del orden de 1 cm en estos planos. Con el objetivo de eliminar estas diferencias se intentó promediar 200 capturas, y tal como se observa el comportamiento no mejora, por lo que en principio se obtiene información de muy alta precisión pero con poca exactitud.

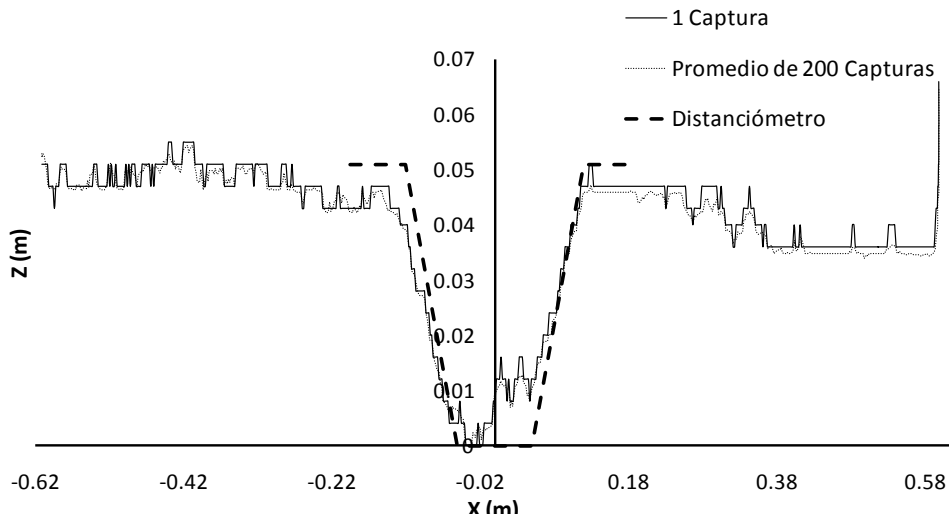


Figura 30: Medición sobre canal rectilíneo de sección trapezoidal

Superficie plana e inclinada

Con el fin de explicar el comportamiento escalonado observado en la Figura 30 se realizaron mediciones sobre una superficie horizontal de madera, donde se detectó lo mismo, descartando que este proceso responda al tipo de superficie.

El comportamiento escalonado, está caracterizado por lo que se conoce como “Step Size” (ΔZ_k), cuyo valor es importante de cuantificar y está definido por la Ecuación 11.

$$\Delta Z_k = (Z_{k,i+1} - Z_{k,i}) \quad (11)$$

Donde el subíndice i representa la posición en la nube de puntos.

Se calculó este valor en toda la imagen, y se observa que el mismo varía entre ± 2 mm, lo cual se repite para todas las experiencias realizadas (Figura 31).

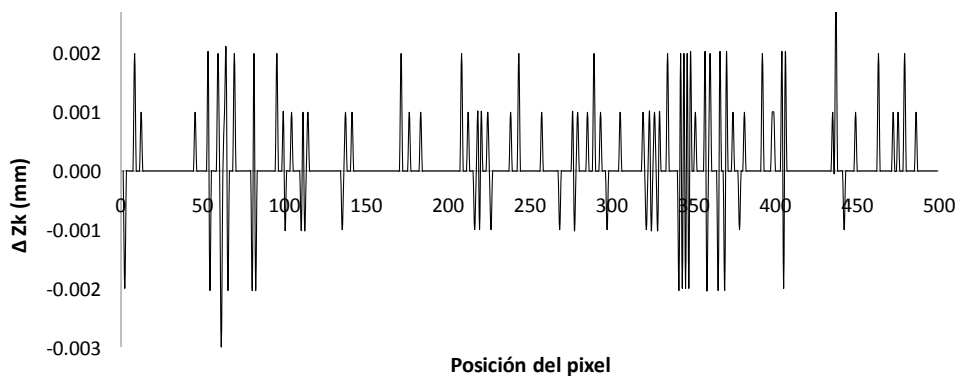


Figura 31: Valores de “Step Size” (ΔZ_k). A modo de ejemplo y por razones de prolijidad se graficaron los valores correspondientes a una fila de la imagen. Las mediciones se realizaron sobre una superficie plana horizontal

Si bien los valores numéricos que se obtienen para las tres coordenadas (X_k , Y_k , Z_k) tienen una precisión de 0.1 mm se debe a la propia aplicación de las ecuaciones 8, 9 y

10. El formato de la información digital que el sensor envía al receptor es entero, lo que explicaría este comportamiento.

Lo mencionado anteriormente ya fue detectado por Mankoff y Russo (2012), en el gráfico que se presenta en la Figura 32, donde el DN es el valor de disparidad obtenido por el sensor de movimiento y el step size es la diferencia entre un DN y el siguiente, observando que éste es una función de la distancia que se esté midiendo.

Sobre esta misma superficie se detectó que los valores Z_k , dentro de una misma captura, varían a medida que se acercan a los bordes de la imagen, tal como se observa en la Figura 33, donde se representan valores de Z_0 definida por la Ecuación 12

$$Z_0 = Z_k / Z_{min} \quad (12)$$

donde Z_{min} es el mínimo de la serie.

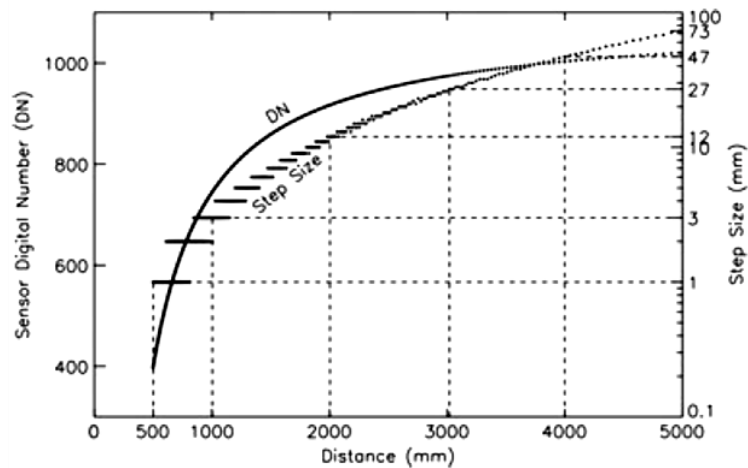


Figura 32: DN y step size vs distancia de medición (Mankoff y Russo, 2012)

La Ecuación 13 representa la diferencia que existe entre los valores de Z_k y el mínimo de la captura (Z_{min}).

$$D = (Z_{k,i} - Z_{min}) \quad [13]$$

En la Figura 34, se representan los valores de D para mediciones realizadas a 0.60 m y 1.01 m, observando que en la primera éste alcanza los 8 mm y en la segunda 14 mm, por lo que para estos casos particulares la diferencia aumenta con la distancia de captura, fenómeno que ya fue observado por Khoshelham (2012). A la misma superficie de madera utilizada en el procedimiento anterior se le dio una inclinación conocida la cual fue relevada con distanciómetro. Se realizaron las correspondientes capturas con la Xtion-Pro a la cual se le restó ordenada a ordenada el plano de

pendiente conocida (Figura 35). Se observa que la diferencia es mayor en la zona más alejada del eje de captura de la Xtion-Pro confirmando lo observado en la Figura 34.

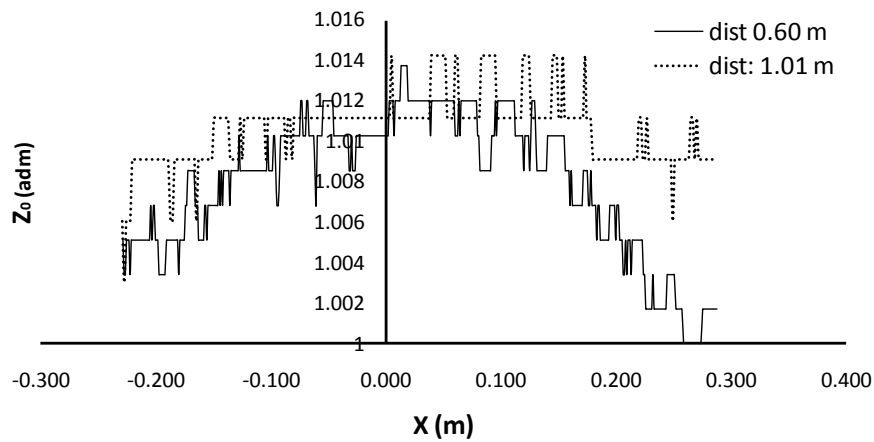


Figura 33: Variación de los valores de Z_0 en el dominio capturado

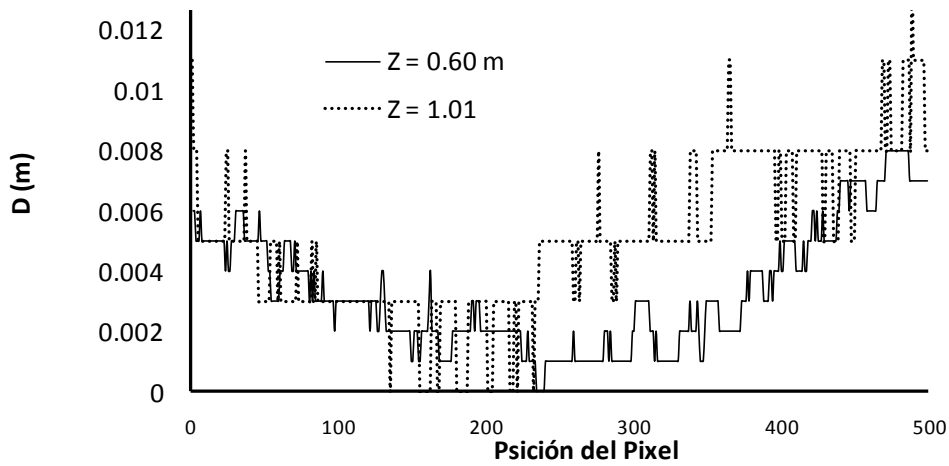


Figura 34: Diferencia entre los valores Z_k y el mínimo de la captura

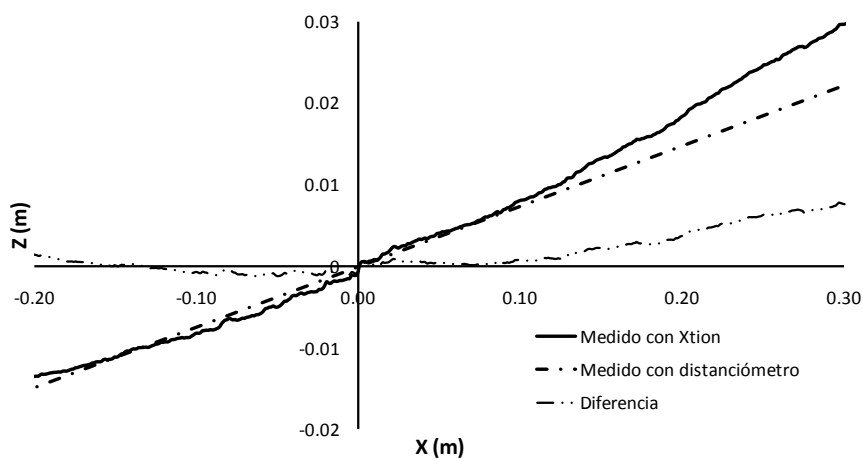


Figura 35: Perfil obtenido con mediciones de XtionPro, con distanciómetro, y su diferencia

Mediciones distribuidas temporalmente

Según Chow et. al (2012), las mediciones no se mantienen en el tiempo, sino que tienden a un valor constante con el transcurrir del mismo, es decir el sensor de

movimiento requiere de un tiempo de precalentamiento (warm-up time) a partir del que se estabilizan temporalmente las capturas. Esto podría explicarse ya que el patrón proyectado se genera a través de un proceso de difracción por rejillas, y su forma está ligada a la longitud de onda del haz incidente. Este precalentamiento podría atribuirse al periodo que requiere el emisor para que la longitud de onda sea constante. Para comprobar esto, se realizaron mediciones durante 90 minutos sobre una superficie plana y horizontal, donde se tomaron los valores de Z_k correspondientes a tres píxeles y se observó el comportamiento del valor de profundidad.

En la Figura 36 se observa que recién a partir de los 60 minutos los valores medidos en los tres píxeles adquieren un comportamiento constante.

Con los valores de Z_k obtenidos para un pixel arbitrario, se calculó el desvío estándar para intervalos de tiempo de 10 minutos (Figura 37), observando nuevamente que luego de los 60 minutos este valor tiende a ser constante.

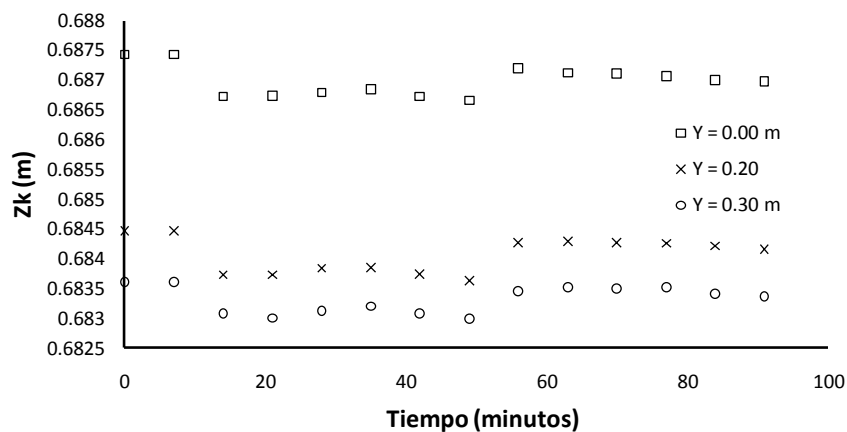


Figura 36: Evolución temporal del valor de tres píxeles correspondientes a la distancia a una superficie plana horizontal

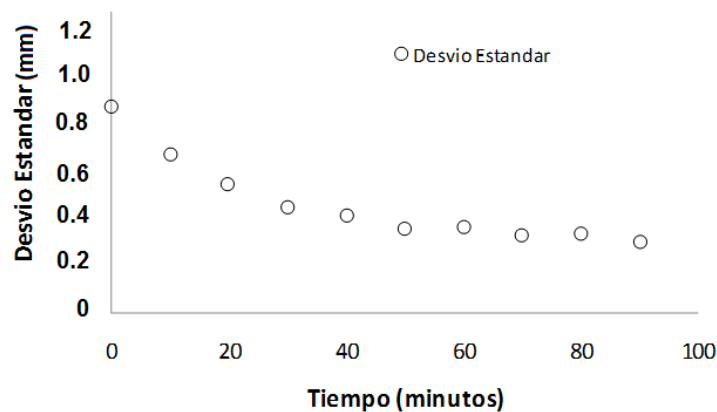


Figura 37: Evolución temporal del desvío estándar del valor de profundidad de un píxel, calculado para intervalos de 10 minutos

Comparación entre distintos sensores y librerías de captura y procesamiento.

Medición de la misma superficie con Xtion-Pro y Kinect

Se realizaron mediciones sobre una superficie horizontal con el sensor de movimiento Kinect y Xtion-Pro con el objetivo de comparar el comportamiento de ambos. La adquisición de los datos se realizó con dos librerías: PCL y Kinect_register (Figura 38)

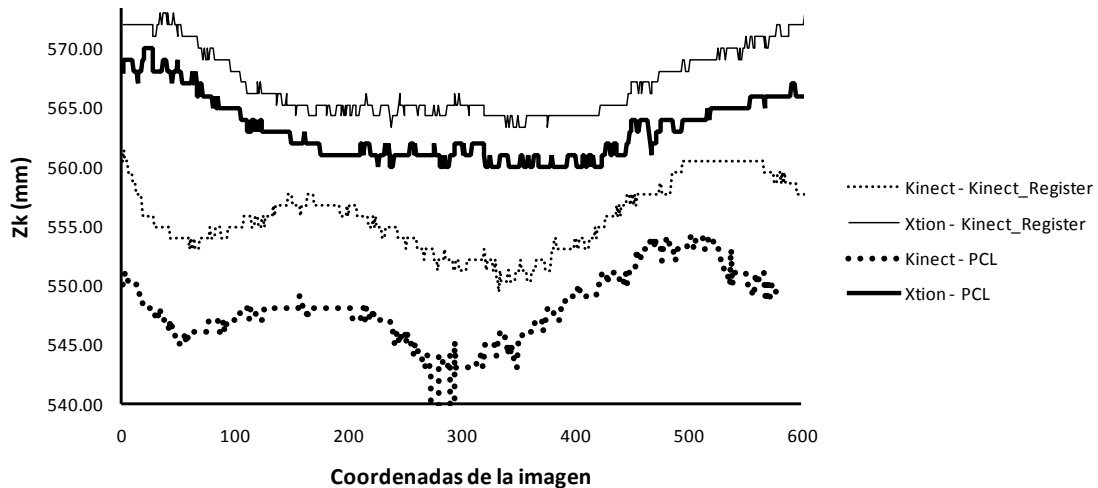


Figura 38: Mediciones realizadas con dos sensores distintos (kinect y XtionPro) y procesadas con dos librerías

En la Figura 38 se graficó un perfil correspondiente a la medición realizada. Se observa que si bien el hardware de los sensores es el mismo, los valores de profundidad varían así como también lo hace el comportamiento de las mismas, por lo que habría elementos externos (como la lente plástica por ejemplo) propios de cada equipo que podrían modificar los valores de las mediciones y los comportamientos de las mismas. Algo similar se observa en los valores obtenidos a partir del procesamiento de datos con las diferentes librerías, lo que indica que cada código de procesamiento posee parámetros propios de transformación DN – profundidad.

En base a estas observaciones, y habiendo notado que en el caso de las mediciones realizadas con la XtioPro Live existe una zona donde los valores parecen ser más uniformes (zona central) es que se decide utilizar este equipo para los próximos desarrollos. Dada la diferencia existente entre los parámetros de transformación DN – profundidad, se escribió un código en Python y GNU Octave que permite realizar el procesamiento de datos y análisis de la disparidad a partir de parámetros conocidos.

Conforme a los resultados obtenidos, y en vista de esta última observación, se concluye en la necesidad de continuar estudiando los sensores de movimiento como posible alternativa para realizar relevamientos topográficos a escala de laboratorio.

CAPÍTULO 3

Puesta a Punto del Canal Experimental

Experimentos en canales rectilíneos

Con el objetivo de validar el funcionamiento del canal experimental, y de la metodología propuesta para la operación del mismo, se desarrollaron una serie de experimentos sobre canales rectilíneos, con diferentes combinaciones de caudales, pendientes y sección inicial, comparando los parámetros obtenidos con los existentes en la literatura para canales experimentales en régimen, tomando como base el trabajo realizado por Pilán et al. (2003), ya que el mismo contiene una amplia recopilación de datos experimentales.

Se realizaron una serie de ensayos donde las variables fueron el caudal, la pendiente y la sección inicial. Para diferentes combinaciones de caudal y pendiente se utilizaron dos secciones iniciales excavadas sobre la mesa de arena (Tabla 7), una de 10 cm de fondo (sección A) y una inclinación de talud de 2:1 y otra de 30 cm de fondo (sección B) y la misma inclinación del talud.

De un total de 11 ensayos realizados, sólo los últimos 6 se tomaron como válidos ya que en los primeros no se pudo lograr flujo uniforme y se observó una variación del ancho de la sección en la dirección longitudinal del canal, lo cual se atribuye a la cercanía de las condiciones de borde aguas abajo y aguas arriba definidas en forma inadecuada.

Tabla 7: Combinaciones de variables ensayadas

Ensayo	Sección	Q (l/s)	S ($\times 10^{-3}$)
E1	B	1.32	2.5
E2	A	0.63	2.5
E3	A	0.88	4
E4	B	1.14	4
E5	B	0.93	1.5
E6	A	0.63	1.5

En todos los casos se comienza el ensayo con caudales bajos y progresivamente se aumentan los mismos hasta llegar al caudal deseado, lo cual se logra a través de la válvula esclusa mencionada cuando se describió el equipo experimental. En el mismo capítulo también se presentó la metodología para la medición definitiva de los

caudales líquidos y el dispositivo para la medición de caudales sólidos (filtro de alta eficiencia). Este último se interpone entre la descarga y la cisterna, durante un tiempo no menor a 20 minutos, luego se deja secar durante un tiempo de 7 días aproximadamente y se pesa el filtro más el sedimento, conocido el peso del filtro seco y el tiempo, es posible estimar el caudal sólido.

En todos los casos estudiados, la sección inicial fue insuficiente, generándose un ensanchamiento de la misma, tal como se observa en la Figura 39.



Figura 39: Sección del canal a 2 hs del comienzo (izquierda), 14hs (centro) y sección final (derecha)

En cada uno de los ensayos se midieron al menos 4 secciones (ANEXO II), donde se tomaron coordenadas verticales cada 1 cm, a partir de las cuales se realizó una interpolación lineal sobre un mismo sistema de ejes coordenados obteniendo de esta manera una sección promedio (Figura 40) sobre la cual se calcularon diversos parámetros hidráulicos y morfológicos tales como la razón de aspecto (Γ), el área (A), el perímetro mojado (P), el radio hidráulico (R) y profundidad relativa (H^*).

En el trabajo realizado por Pilán y colaboradores (op. cit), se muestra una gran cantidad de datos obtenidos en canales estables, las relaciones entre los parámetros hidráulicos que éstos deben cumplir para satisfacer dicha condición y se verifica la aplicabilidad de los micro-canales para la obtención de datos relativos a la evolución y estabilidad de ríos de llanura. Por lo mencionado anteriormente, fueron estos gráficos los utilizados para realizar las tareas de validación propuestas.

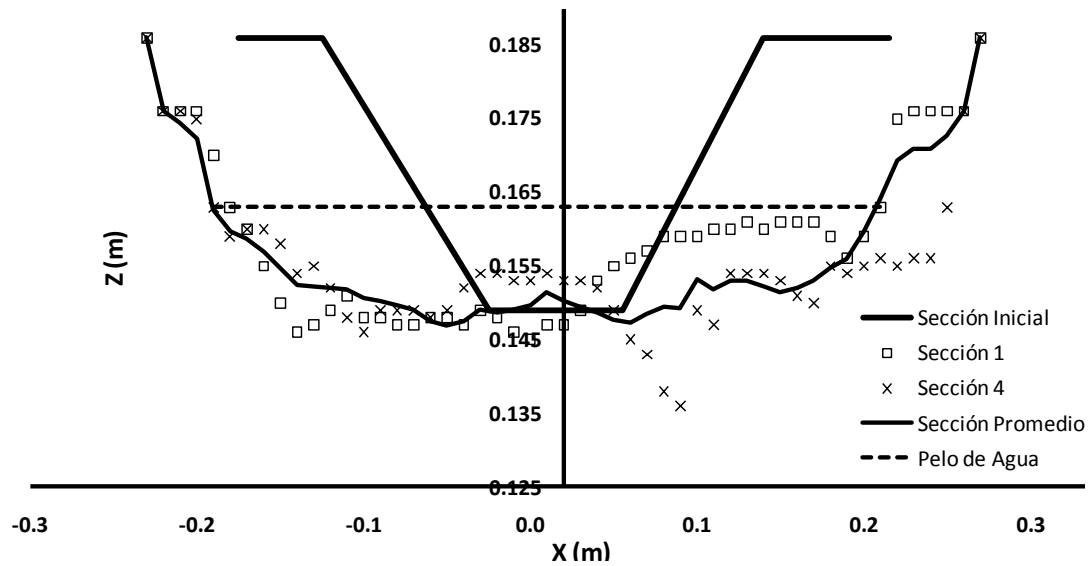


Figura 40: Configuración de las distintas secciones de control

La razón de aspecto, definida como la relación entre el ancho superficial (T) y el tirante (H) (Ecuación 13) y la profundidad relativa como la relación entre el radio hidráulico y el diámetro medio del material del lecho (Ecuación 14), deberían encontrarse dentro del rango comprendido entre 7 - 70 para la primera y menor a 200 para la segunda.

$$\Gamma = \frac{T}{H} \quad [13]$$

$$H_* = \frac{R}{d_{50}} \quad [14]$$

Se observa en la Figura 41 que los valores obtenidos para los 6 ensayos realizados se encuentran dentro de los valores límites mencionados.

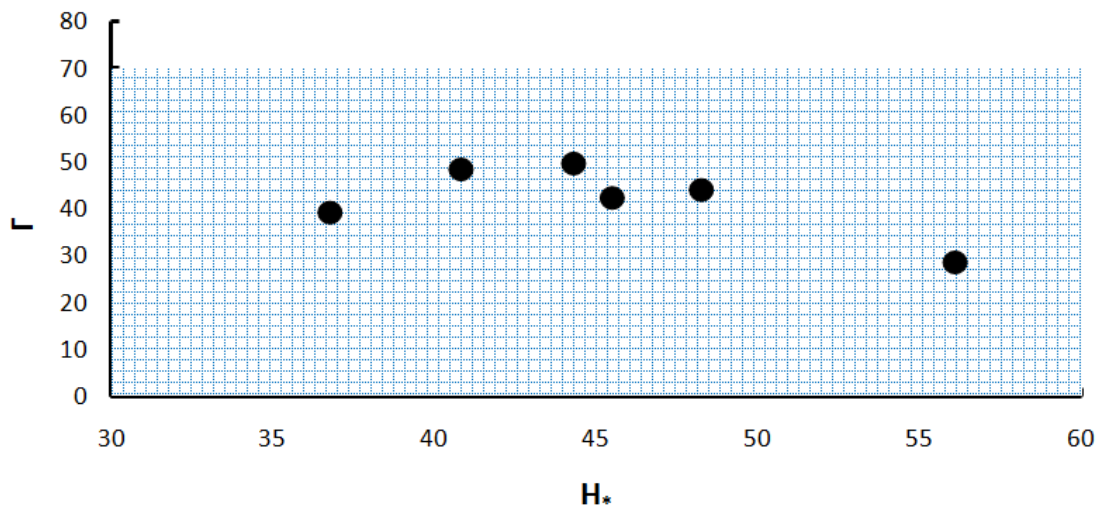


Figura 41: Relación entre la profundidad relativa y la razón de aspecto. El rectángulo con la trama es el área esperada o factible

Un aspecto muy importante en el contexto de la estabilidad de cauces es el de la relación de aspecto en función del caudal adimensional, definido por la Ecuación 15.

En la Figura 42 se observan más de 700 datos de cauces naturales, canales estables y micro-canales y se indica con una elipse roja la zona donde se ubican los resultados del presente trabajo, y si bien los valores de razón de aspecto son un poco elevados, se agrupan dentro de los datos correspondientes a micro-canales.

$$Q_* = \frac{Q}{(g \Delta d^5)^{0.5}} \quad [15]$$

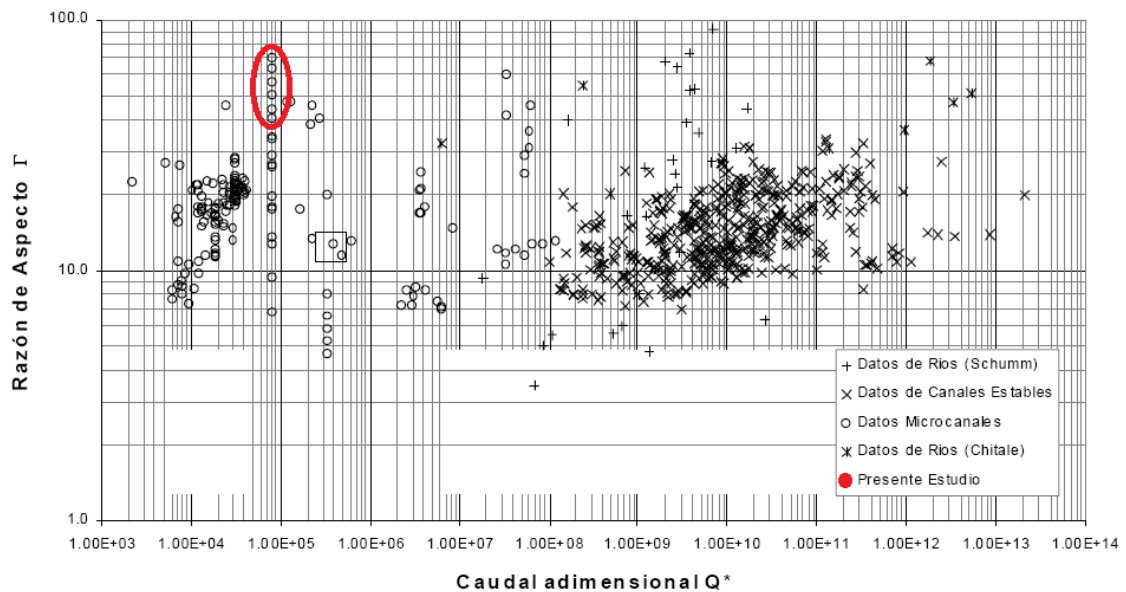


Figura 42: Relación entre el caudal adimensional y la Razón de aspecto para canales de laboratorio y naturales que han alcanzado la estabilidad

En las experiencias realizadas se observó una tendencia a la formación de barras no muy definidas (Figura 43), por lo que se decidió evaluar este proceso a través del gráfico presentado por Yalin y Ferreira da Silva (2001), en el cual se representa en escala doble logarítmica la profundidad relativa en función de la razón de aspecto (Figura 44), donde los valores comprendidos entre L y Lm se encuentran los canales que alcanzan su condición de régimen.

En la misma figura, la zona comprendida entre L_a-L y valores de Γ mayores a 60 responde a cauces donde se generan barras alternas y meandros.

Nuevamente con un círculo rojo, se indica la zona donde se ubican los resultados obtenidos, que como se observa se encuentran al límite de la condición mencionada anteriormente por lo que podría explicarse la tendencia a la formación de estas estructuras en el canal.



Figura 43: Tendencia a la formación de barras, fotografía tomada luego de 40 hs de ensayo aprox. Con un caudal 0.63 l/s y una pendiente de 2.5×10^{-3}

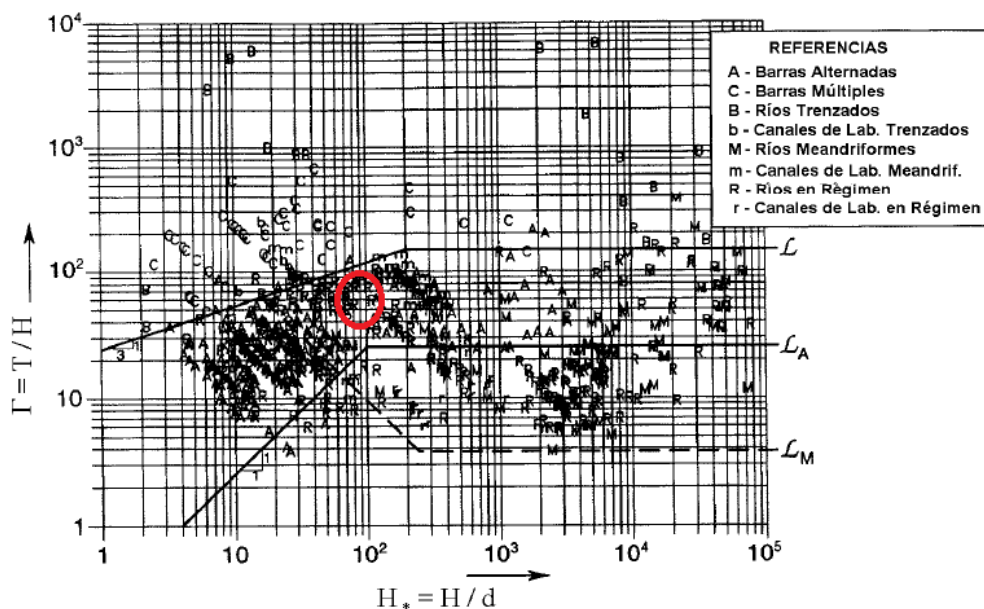


Figura 44: Diagrama de Yalin – Ferreira (2001) para la clasificación de barras sedimentarias

Como se mencionó anteriormente el equipo utilizado cuenta con dos bombas capaces de recircular sedimentos, por lo que se supone que al final del ensayo el canal ha adoptado una configuración de equilibrio hidrosedimentológico, momento en el cual se realizaron las mediciones de caudal sólido.

En la Figura 45 se compararon los valores obtenidos con los correspondientes al gráfico presentado por Pilán et al. (op. cit) en donde no sólo se encuentran datos de sus ensayos, sino que también aparecen valores publicados por Schumm y Khan (1972), quienes trabajaron con diferentes ángulos de ingreso y control de las condiciones de transporte por fondo y suspensión.

Se observa que algunos valores obtenidos se encuentran dentro del rango y otros por debajo, lo cual puede deberse a una condición morfológica de la sección, o alguna limitación vinculada a la metodología utilizada para realizar la medición en los caudales sólidos.

Como resumen se presenta una tabla (Tabla 8) donde se encuentran los parámetros calculados para cada uno de los ensayos realizados.

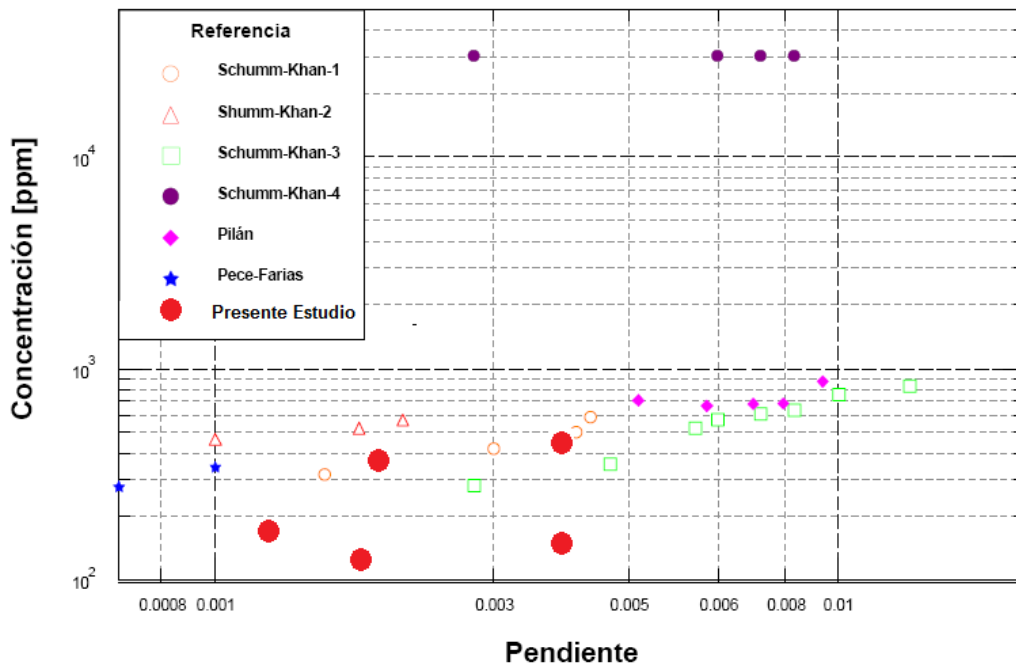


Figura 45: Relación entre la pendiente y la Concentración correspondientes a experimentos sobre canales rectilíneos que han alcanzado el equilibrio hidrosedimentológico

Tabla 8: Resumen de resultados de los ensayos realizados sobre canales de eje rectilíneo para la validación y puesta a punto del equipo experimental

	Q (l/s)	S	R (m)	Γ	Fr	C (ppm)	V (m/s)	τ^*	H (m)
E1	1.32	0.0025	0.014	43.6	0.157	114	0.149	0.0767	0.0148
E2	0.63	0.0025	0.013	41.54	0.062	302	0.088	0.0722	0.0139
E3	0.88	0.004	0.013	49.77	0.083	443	0.105	0.1127	0.0136
E4	1.14	0.004	0.012	48.8	0.22	140	0.162	0.1029	0.0124
E5	0.93	0.0015	0.016	28.4	0.083	72	0.118	0.0541	0.0174
E6	0.63	0.0015	0.011	39.01	0.186	175	0.14	0.0352	0.0113

En donde:

Fr: Nº de Froude.

C: Concentración en partes por millón.

τ^* : Parámetro adimensional de Shields.

En base a los resultados obtenidos y el análisis de los mismos, es posible decir que con el equipo y la metodología propuesta de trabajo se obtuvieron resultados satisfactorios, y que las diferencias existentes con la literatura pueden atribuirse al tiempo de duración de los ensayos, resultando éste probablemente insuficiente para lograr una sección completamente estable.

Debido a la corta longitud del canal, es necesario trabajar con especial atención en la generación de la sección inicial como en las condiciones de aguas abajo y aguas arriba, ya que de lo contrario no es posible lograr flujo uniforme en el canal.

Finalmente, se observó que los valores de concentración obtenidos presentan algunas irregularidades, por lo que se deberá estudiar con mayor profundidad el sistema de medición de caudales sólidos y la duración del ensayo.

Experimentos en canales con curvas

Determinación de los escenarios factibles

Conforme a los satisfactorios resultados obtenidos en los experimentos realizados en canales de eje rectilíneo, es posible decir que en el equipo experimental que se dispone en Laboratorio de Hidráulica es factible reproducir los procesos físicos que se han llevado a cabo en otros equipos experimentales de diferentes características. Con el objetivo de evaluar diversos parámetros hidráulicos y morfológicos de cauces aluviales de laboratorio con curvas, es que se decide comenzar una serie de experimentos en canales trazados sobre la mesa de arena. Los experimentos consisten en generar un cauce con uno o más meandros cuyas características geométricas son conocidas (Figura 46).

La tarea de construcción de este tipo de geometrías se realiza en forma artesanal por operarios de laboratorio, y con un número de dos personas trabajando, demanda un tiempo de ejecución de aproximadamente 5 hs.

Una vez definida la configuración del cauce, se establece la pendiente del canal, se enciende el sistema de bombeo y se aproxima el caudal deseado. Conforme a lo que se establece en la literatura existente acerca de ensayos similares, se establece que al cabo de 30 hs aproximadamente se llegaría a un estado de régimen o equilibrio

sedimentológico (en equipos con recirculación de sólidos). Por este motivo es que se fija un tiempo mínimo de duración de los experimentos de más de 40 hs.



Figura 46: Sección inicial de geometría curva

Los primeros ensayos realizados con este tipo de configuraciones fueron, en general, un fracaso. Tal como se observa en la Figura 47, no fue posible alcanzar un estado de equilibrio como el mencionado ya que el propio desarrollo de la geometría erosionada se ve condicionada por el ancho del equipo experimental.

En vista de este inconveniente se comenzaron a variar los caudales y pendientes de ensayo, con lo que finalmente se concluyó en que para ciertas geometrías iniciales, no importa que combinación de caudal y pendiente se implemente, el ancho del canal es insuficiente, por lo que sólo para ciertas configuraciones iniciales y combinaciones de pendientes y caudales es posible lograr un estado de equilibrio hidrodinámico en el dispositivo experimental que se dispone en el Laboratorio de Hidráulica de la Facultad Regional Córdoba.



Figura 47: Ancho insuficiente del equipo experimental en el primer ensayo realizado con la Geometría 1

Se realizaron ensayos sobre ocho geometrías (Geometría 1, Geometría 2, etc.) iniciales distintas, con diferentes combinaciones de caudal y pendiente, obteniendo de esta manera un total de 30 ensayos. A partir de estos experimentos se logró determinar para qué configuración inicial y combinación pendiente - caudal se alcanza el estado de equilibrio hidrodinámico.

La primera geometría ensayada corresponde a un cauce compuesto por tres tramos rectos y dos meandros, tal como se observa en la Figura 48.

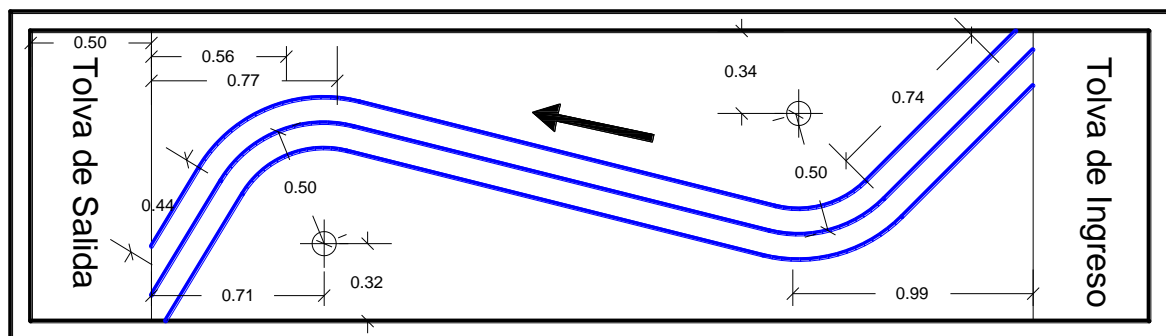


Figura 48: Configuración en planta. Sección inicial. Geometría 1

Sobre la misma se realizaron tres ensayos, el primero con una pendiente de 1.5% y un caudal de 0.4 l/s, el segundo con la misma pendiente y un caudal de 0.3 l/s y finalmente un caudal de 0.3 l/s y una pendiente de 0.9 %. En ninguno de los tres casos ensayados se alcanzó el equilibrio sedimentológico, dado que el ancho del canal experimental fue insuficiente (Figura 49) y el proceso erosivo que se generó en la zona del segundo meandro (cercano a la salida) fue interrumpido por la pared rígida del equipo.



Figura 49: Ancho insuficiente del canal experimental en ensayo realizado con la Geometría 1

En vista de esta problemática se decidió modificar la geometría inicial propuesta y alejar 10 cm el segundo meandro de la salida y acercar el primero 20 cm a la entrada (Figura 50), de esta manera se buscó alejar de la embocadura de salida y de la primer curva a la zona conflictiva. Aquí se ensayaron pendientes de 1.5 y 0.9 %, con caudales de 0.45 y 0.30 l/s respectivamente. Los resultados obtenidos con las modificaciones planteadas se asemejaron a los presentados en la Figura 49, y es por esta razón que se decidió descartar esta configuración.

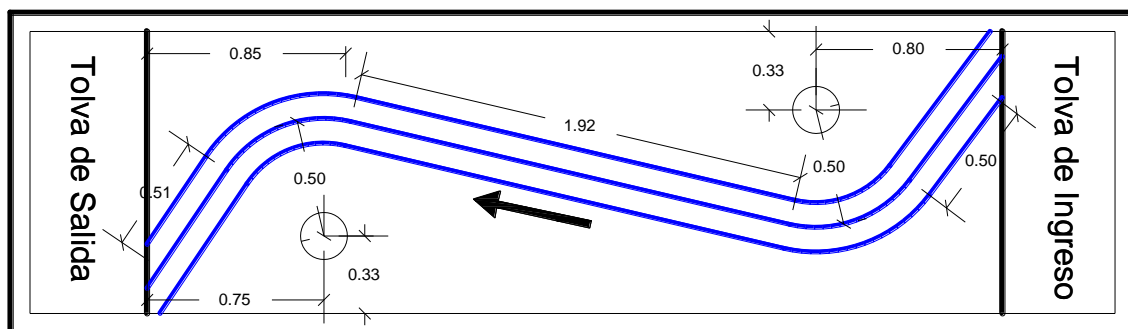


Figura 50: Configuración en planta. Sección inicial. Geometría 2

Se detecta como principal inconveniente la longitud del canal experimental, observando que la influencia de las condiciones de borde sobre los procesos erosivos es muy importante, así como la dificultad de lograr flujo uniforme. Dadas estas consideraciones, se propone alejar la curva del canal de ambos extremos, y se propone una geometría tal como la que se observa en la Figura 51. Con esta geometría se ensayaron 2 pendientes y dos caudales para cada una de ellas, y en todos los casos los resultados fueron similares y la constante fue, nuevamente, el ancho insuficiente del equipo experimental (Figura 52). Cabe mencionar que se introdujo una variante (Geometría 4), en donde se alejó el eje de la curva 20 cm más del borde y finalmente en los resultados se observa la misma problemática.

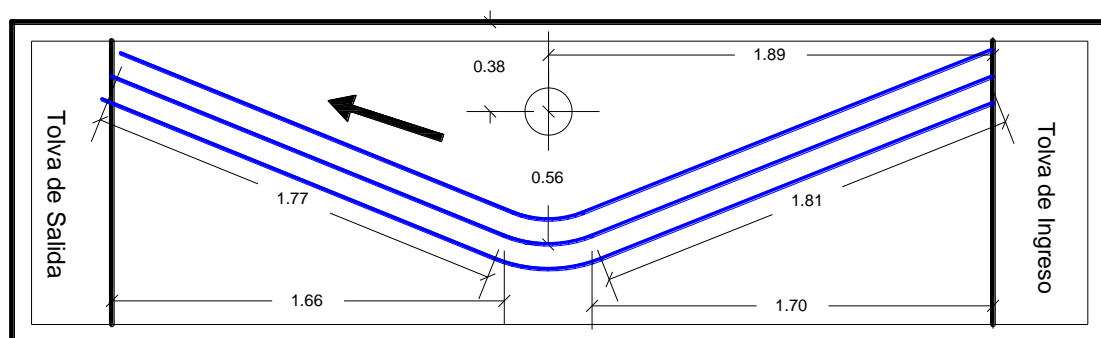


Figura 51: Configuración en planta. Sección inicial. Geometría 3



Figura 52: a la izquierda la sección inicial y a la derecha la sección erosionada poniendo en evidencia el ancho insuficiente

Nuevamente se decide modificar la configuración de la sección inicial. En base a los resultados obtenidos en los ensayos anteriores, y tal como ya se mencionó, los procesos que se desarrollan en el experimento se ven altamente influenciados por las condiciones de borde. Realizando un análisis cualitativo detallado de la situación mencionada, es posible determinar que la geometría erosionada (al final de los experimentos), en las cercanías a la entrada del canal, fue siempre similar, no siendo así en las cercanías de la salida. Por esta razón y dadas las condiciones de flujo subcrítico que se desarrollan, se decide finalmente adoptar una nueva configuración tal como la que se observa en la Figura 53 alejando lo suficiente a la zona meandrosa de la salida del canal.

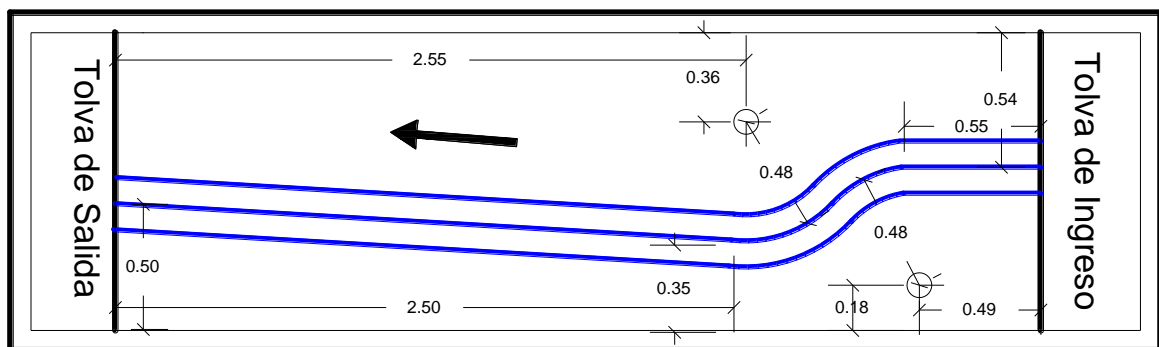


Figura 53: Configuración en planta. Sección inicial. Geometría 5

Con esta configuración y algunas variantes de la misma (Geometrías 6, 7 y 8. Ver ANEXO II) se realizaron 18 ensayos donde se combinaron diferentes pendientes y caudales. Bajo estas condiciones el 89 % de los ensayos alcanzaron el estado de equilibrio hidrosedimentológico, llegando a una configuración estable dentro del dominio del equipo experimental (Figura 54).



Figura 54: Sección inicial a la izquierda (Geometría 6), en el centro a las 30 hs de ensayo y a la derecha, la sección erosionada donde finalmente se alcanzó el equilibrio hidrosedimentológico (48 hs de ensayo)

En base a los resultados obtenidos, los cuales se encuentran resumidos en la Tabla 9, se propone como configuraciones de referencia para el canal experimental, las Geometrías 6 y 8, las cuales se observan en la Figura 55 y Figura 56.

Tabla 9: Resumen de experimentos realizados en canales con curvas

Nº Geometría	Caudal (l/s)	Pendiente (%)	Equilibrio Hidrodinámico
1	0.45	1.5	No Alcanzado
	0.3	1.5	No Alcanzado
	0.3	0.9	No Alcanzado
2	0.45	1.5	No Alcanzado
	0.3	0.9	No Alcanzado
3	0.3	1.5	No Alcanzado
	0.31	0.9	No Alcanzado
4	0.29	0.9	No Alcanzado
	0.43	0.9	No Alcanzado
5	0.22	0.8	Alcanzado
	0.42	0.8	No Alcanzado
	0.21	1.2	No Alcanzado
6	0.2	0.6	Alcanzado
	0.15	0.9	Alcanzado
	0.24	1.2	Alcanzado
	0.16	1.2	Alcanzado
	0.12	1.8	Alcanzado
	0.08	1.8	Alcanzado
	0.42	0.8	No Alcanzado
7	0.2	1.2	Alcanzado
	0.41	0.9	No Alcanzado
8	0.2	0.6	Alcanzado
	0.16	0.6	Alcanzado
	0.13	0.6	Alcanzado
	0.13	0.8	Alcanzado
	0.2	0.9	Alcanzado
	0.15	0.9	Alcanzado
	0.11	1.2	Alcanzado
	0.16	1.2	Alcanzado
	0.13	1.8	Alcanzado

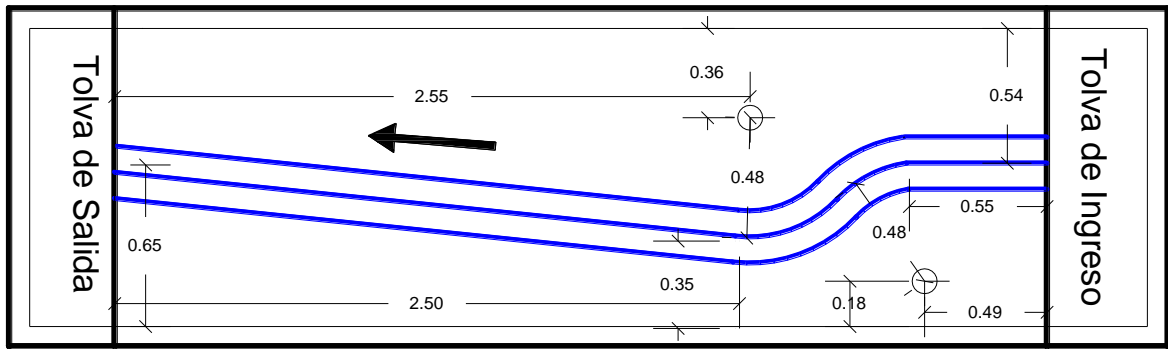


Figura 55: Configuración en planta. Sección inicial. Geometría 6

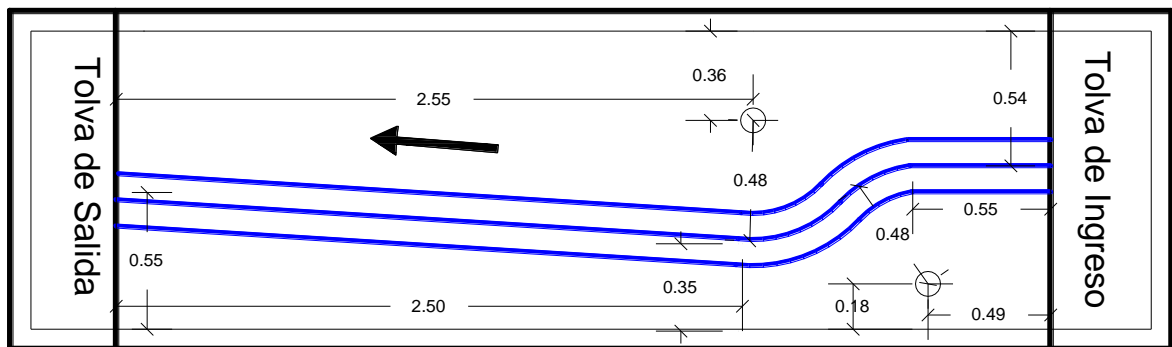


Figura 56: Configuración en planta. Sección inicial. Geometría 8

CAPÍTULO 4

Desarrollo de una Técnica de Medición con un Sensor de Movimiento en Geometrías Secas

Tal como se observó en el CAPÍTULO 3, en las tareas de puesta a punto del canal experimental, se realizó una serie de ensayos sobre canales de eje rectilíneo en una primer instancia y en canales de eje curvo en una segunda etapa, validando así el equipo experimental y definiendo diversos escenarios factibles de ensayar (combinaciones de geometría inicial, pendiente y caudal).

En la primer serie de ensayos (canales de eje rectilíneo) los relevamientos planialtimétricos se realizaron con el distanciómetro laser presentado en el CAPÍTULO 2, y se relevaron secciones transversales al eje de cauce. Esta tarea es considerablemente más dificultosa cuando la geometría a relevar es de eje curvo, ya que para realizar el relevamiento de una sección transversal al eje del cauce se requiere de la modificación de la posición de los dos carros (el de movimiento transversal y longitudinal) para cada punto relevado. Es por esta razón que las mediciones son puntuales y la densidad de la nube de puntos depende pura y exclusivamente de la voluntad y disponibilidad del laboratorista. Dicho de otra manera, la utilización de un distanciómetro laser montado sobre un sistema de carros de traslación manual para el relevamiento de geometrías de eje curvo, es una técnica que tiene como ventaja el no ser intrusiva pero como contrapunto el hecho de ser altamente ineficiente (relación puntos relevados vs tiempo empleado).

Técnica y Procedimiento

Análisis de la captura. Selección de los parámetros óptimos

En vista de esta problemática, en base a los experimentos realizados por Mankoff y Russo (2012) y teniendo en cuenta los resultados presentados en el CAPÍTULO 2, los sensores de movimiento parecen ser una alternativa viable para realizar relevamientos tridimensionales con alta resolución espacial, de muestreo y de bajo costo.

En la Figura 33 y Figura 34 (donde se observan variaciones de diversos parámetros obtenidos a través de la medición de una superficie plana horizontal) se observa en los

perfiles graficados, que en la zona central existe una mayor uniformidad en los resultados obtenidos, fenómeno que se repite en las mediciones realizadas sobre la misma superficie con la XtionPro Live y que se observan en la Figura 38. Este comportamiento se observó en numerosas experiencias realizadas, por esta razón se supone que no toda la imagen tiene la misma precisión. Con el fin de verificar lo hasta aquí supuesto, se realizaron mediciones sobre una superficie plana horizontal y se calculó en rango definido por la ecuación 16.

$$\text{rango (mm)} = Z_{kij} - Z_{min} \quad [16]$$

En el gráfico de la Figura 57 se encuentran representados todos aquellos puntos relevados cuyo rango es mayor a 6 mm, y tal como se suponía en la zona central de la imagen, las mediciones parecen ser mas uniformes y es por esta razón que se decide evaluar la posibilidad de tomar una sub matriz (ventana) cuyo tamaño satisfaga los requerimientos en cuanto a la calidad de las mediciones y la superficie de captura.

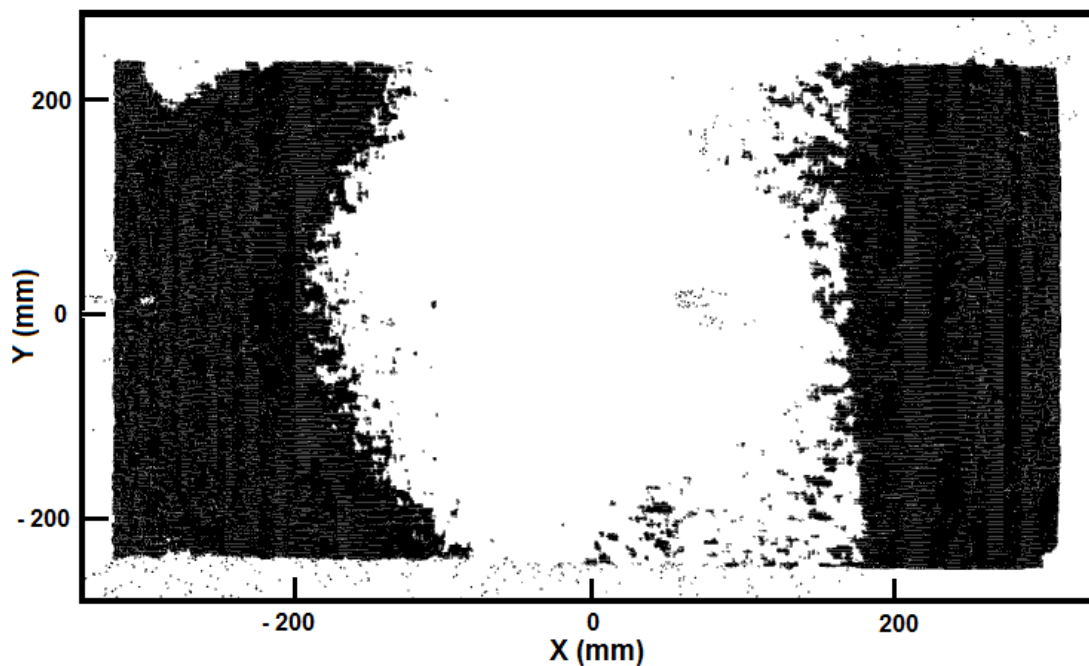


Figura 57: puntos cuyo rango es mayor a 6 mm dentro de la imagen relevada

Se realizaron mediciones sobre superficies planas (horizontales e inclinadas) y a diferentes alturas de captura. Se comienza con una sub matriz de 3 x 4 pixeles, la cual se encuentra centrada, se calcula el plano de mejor ajuste por regresión lineal múltiple y a partir de ésta los residuos, sobre los cuales se calculan algunos parámetros

estadísticos. Luego se amplía ésta sub matriz, de manera que su relación siga siendo 3:4 (relación de la matriz original de 640 x 480) y se repite el procedimiento.

En la Figura 58 se observa la variación de la media de los valores absolutos (v.a.) de los residuos de la sub matriz en función del tamaño del lado menor de la misma. Cada curva corresponde a un mensurando distinto.

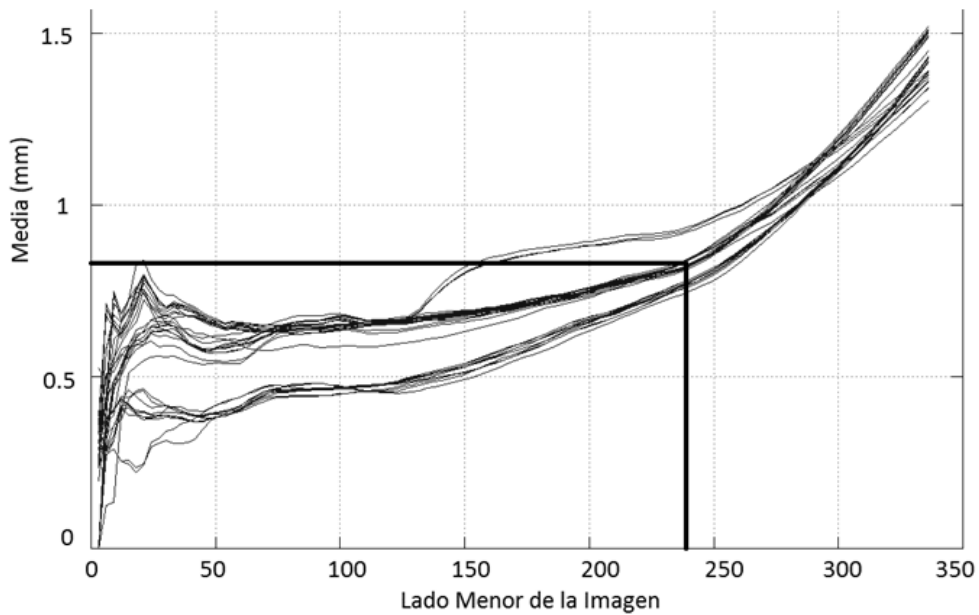


Figura 58: Media de los v.a. de los residuos para cada tamaño de ventana

En base a los estadísticos calculados a partir de los v.a. de los residuos se considera que una ventana de 240 x 320 píxeles parece ser una buena relación entre exactitud y tamaño de captura. Con el fin de verificar lo mencionado se trazaron curvas de frecuencia acumulada de los v.a. de los residuos para distintos mensurandos (Figura 59), donde se observa que en todos los casos más del 80% de los residuos se encuentra por debajo del milímetro.

Hasta el momento los parámetros fueron calculados a partir de los residuos generados en una submatriz de 240 x 320 que se encuentra centrada en el MDE. Nada hasta aquí garantiza que esta sea la posición más adecuada de la ventana, por lo que se nuevamente se realiza un análisis estadístico sobre los residuos ahora variando la posición de una ventana de 240 x 320.

En la Figura 60 cada uno de los polígonos corresponde a mediciones realizadas sobre diferentes mensurandos, y son una envolvente convexa de las posiciones de la esquina superior izquierda de la sub matriz, para las cuales el 80% de los residuos fueron

menores a 1 mm. Esto valida la hipótesis de que para el sensor de movimiento utilizado, la posición centrada resultó ser adecuada.

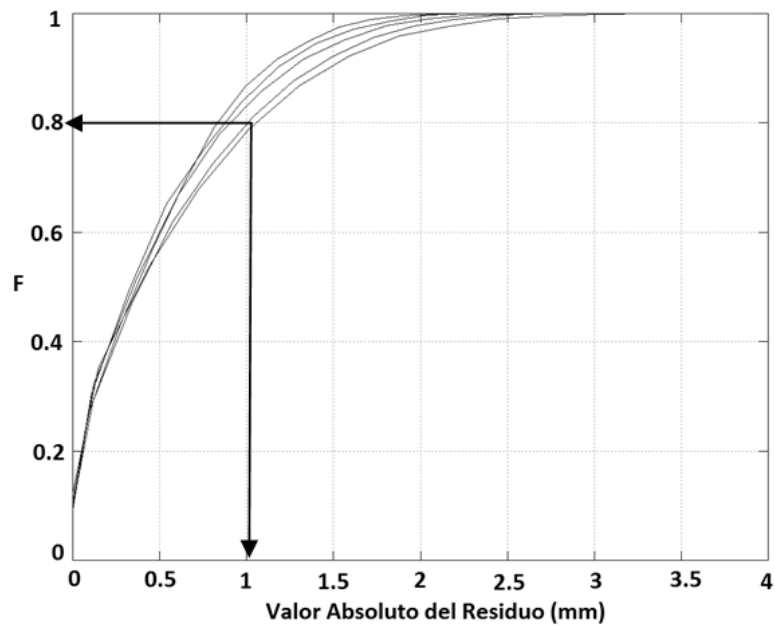


Figura 59: Frecuencia de los residuos para distintos mensurandos

Lo anteriormente descrito puede observarse en la Figura 61 donde se grafica la variación espacial del valor absoluto del residuo, y en la cual se encuentra delimitada el área correspondiente a la imagen centrada de 320 x 240 píxeles.

Otro parámetro importante a determinar es la cantidad de capturas del mismo mensurando que se deben promediar para que los resultados finales sean satisfactorios.

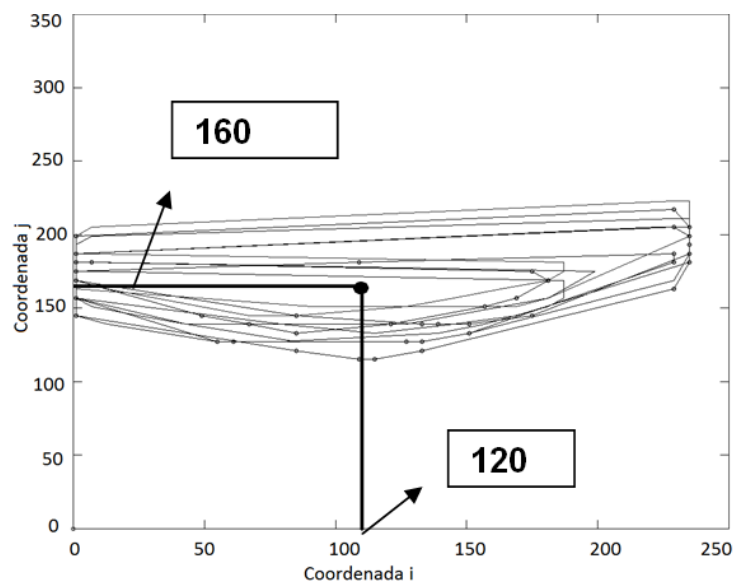


Figura 60: Coordenadas de la esquina correspondiente a la sub matriz de 320 x 240. El punto indica la posición centrada.

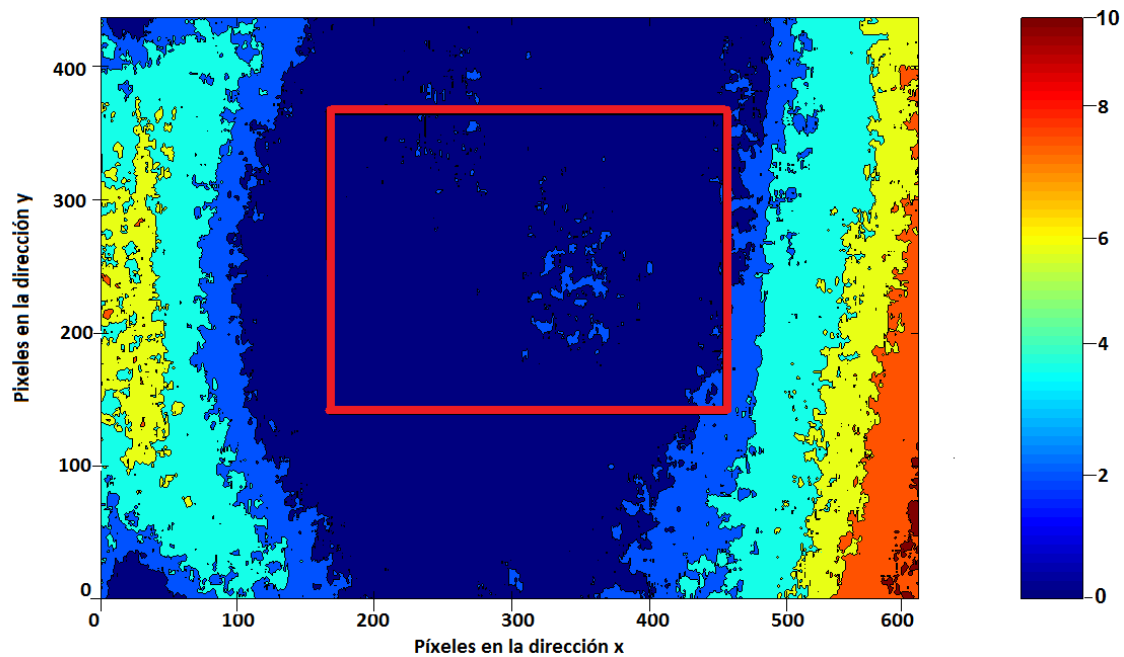


Figura 61: variación espacial de valor absoluto del residuo (en mm)

Llamando “observación” al promedio de múltiples capturas consecutivas, y llamando P1 a una captura, P2 al promedio de 2 capturas, P3 al promedio de 3, etc., se observó que para un mismo mensurando al aumentar el número de capturas promediadas en una observación se mejora la calidad de los resultados. En la Figura 62 se representa el porcentaje de puntos cuyo residuo es mayor a un valor límite en función de ese valor para observaciones con distintos números de capturas promediadas. Se puede apreciar que estos porcentajes disminuyen a medida que se realizan los promedios mencionados.

Con un valor de diez capturas promediadas, en ningún caso existen residuos por encima de los 3 mm, y en todos los casos observados casi el 90% de los mismos son menores a 1 mm.

Lo mencionado se observa claramente en la Figura 63, donde se trazaron curvas de frecuencia relativa acumulada del v.a del residuo, donde cada una representa una observación (P1, P3, etc.) y nuevamente para un promedio de 10 capturas (P10) más del 90% de los residuos están por debajo del milímetro.

Con el procedimiento descrito fue posible determinar 3 parámetros importantes para realizar mediciones de calidad con un sensor de movimiento, el primero el tamaño de una sub matriz donde los resultados son menos dispersos, el segundo la posición de esa sub matriz dentro del MDE y la tercera la cantidad de fotogramas a promediar para que los resultados sean confiables. No es posible asegurar que estos parámetros sean

universales para todos los equipos, razón por la cual se recomienda realizar este análisis para cada instrumento en particular.

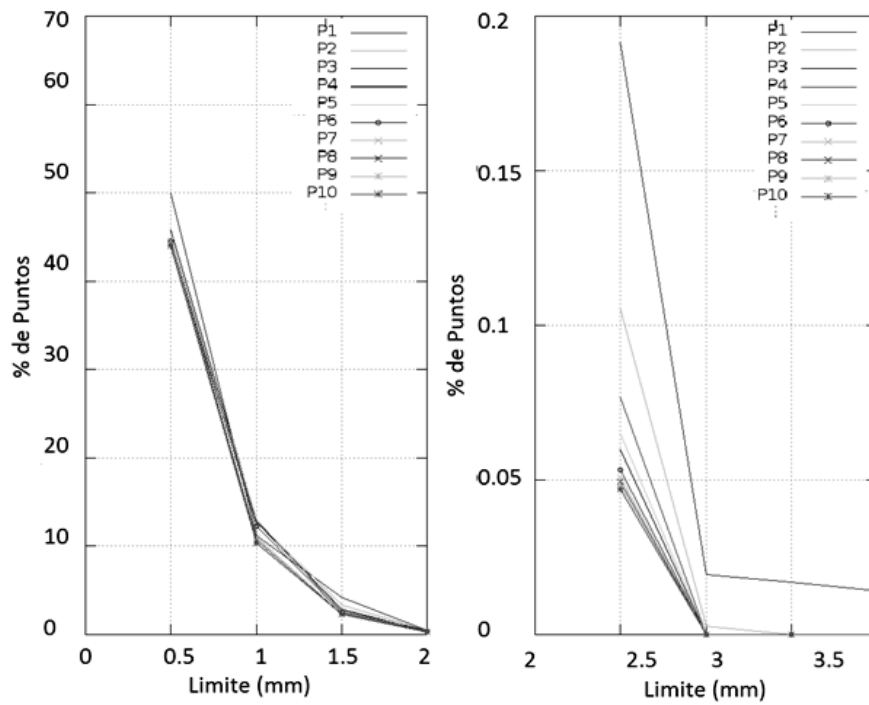


Figura 62: porcentaje de puntos cuyo residuo se encuentra por encima de un determinado valor límite para distintas observaciones, a la izquierda con un límite menor a 2 mm y a la derecha de 2 a 4 mm.

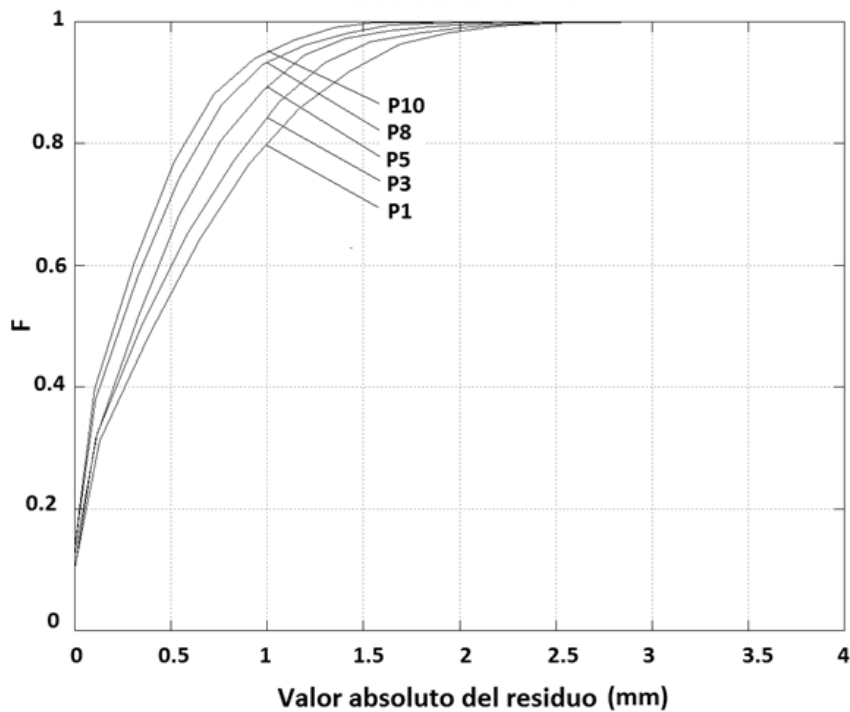


Figura 63: Curva de Frecuencia relativa acumulada de los residuos para observaciones con distinta cantidad de imágenes promediadas

Relevamiento de grandes superficies. Concatenación

La técnica hasta aquí planteada tiene una fuerte limitación, que es el tamaño de la superficie relevada, que según se ha demostrado, a la distancia de captura necesaria es de 24 cm x 32 cm aproximadamente. Con el objetivo de salvar esta limitante, se desarrolló un mecanismo de concatenación, el cual permite realizar relevamientos de mayores superficies. Se toman 10 capturas de la geometría a mensurar o parte de ella y se promedian, obteniendo así una observación, luego se desplaza el sensor de movimiento un valor conocido (dx) de forma tal que la imagen anterior y la que se está por capturar se superpongan un 50% (Figura 64).

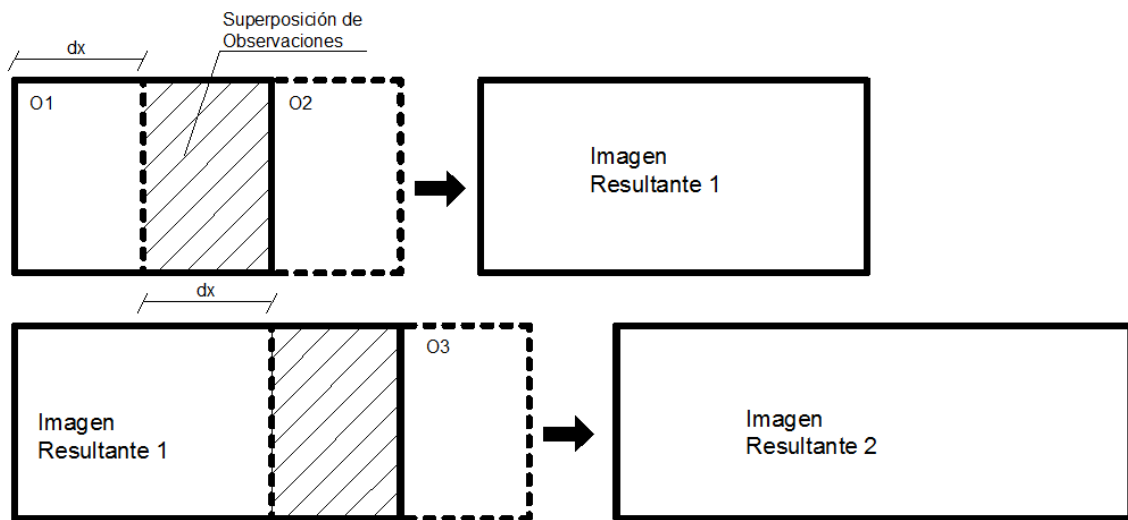


Figura 64: Proceso de superposición y concatenación de imágenes en una dirección

Esto se repite hasta lograr el relevamiento completo de la superficie en estudio y para ambas direcciones (x e y). Una vez relevada toda la geometría y con las coordenadas de los desplazamientos conocidas, se concatenan todas las imágenes y se genera un modelo de elevación digital de la micro topografía mensurada.

Dicho en otras palabras, lo que el procedimiento propone es realizar un cambio de coordenadas locales o de la imagen, a un sistema global a partir de las matrices de coordenadas planimétricas propias de cada imagen y los desplazamientos conocidos.

Como ya se ha mencionado en el CAPÍTULO 3, si bien la información se condensa en arreglos regulares (matrices de 480 x 640 o de 240 x 320 pixeles), las mallas planimétricas no lo son, por lo tanto el tamaño de cada pixel varía elemento a elemento. Este aspecto es muy importante a la hora de realizar el promedio en el

sector superpuesto de la imagen, ya que los desplazamientos dx y dy no deben medirse en unidades de la imagen, si no deben considerarse a partir de las matrices X e Y de coordenadas planimétricas.

Para que el proceso de concatenación sea exitoso, y se mantenga el nivel de calidad de la información, es indispensable que los pasos previos se hayan realizado cuidadosamente. La dirección de los desplazamientos longitudinales y transversales del sistema de montaje del sensor deben coincidir con la dirección de los ejes X e Y de la propia cámara.

En la Figura 65, se observa esquemáticamente una vista en planta de dos capturas. A la izquierda la concatenación se realizará adecuadamente, ya que en la zona de superposición los puntos relevados con una u otra captura se corresponden. A la derecha de la misma, se promediará información que no se corresponde por lo que los resultados no serán satisfactorios. Igualmente importante es la horizontalidad de la cámara, ya que si esto no se cumple, nuevamente la información obtenida luego de promediar los puntos que se superponen será de baja calidad. En la Figura 66 se observa claramente este fenómeno, y lo que sucede cuando el plano de la cámara no es el mismo que el del desplazamiento.

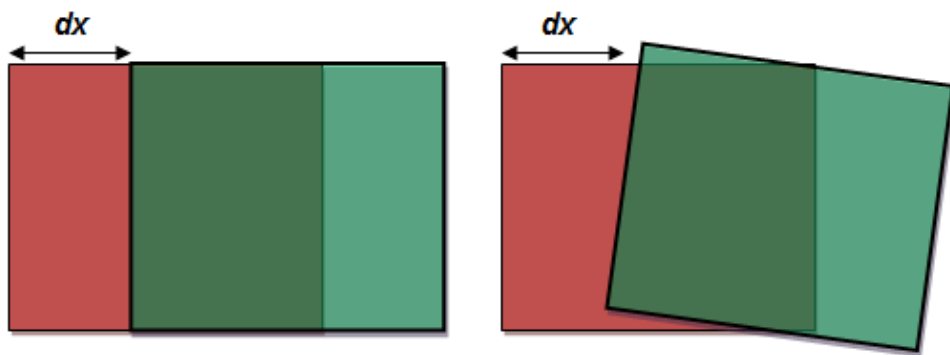


Figura 65: A la izquierda los ejes de la cámara son paralelos a la dirección del desplazamiento, a la derecha no

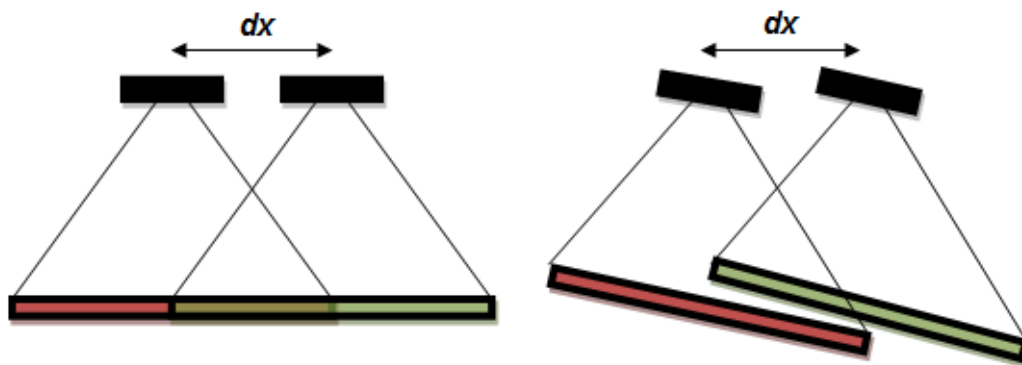


Figura 66: A la izquierda la cámara se encuentra paralela al plano de desplazamiento, a la derecha no

Otra alternativa a esto es la de no promediar la información superpuesta, con lo que en ese sector se obtendrá una malla más densa de información. Esto facilita considerablemente el trabajo de concatenación, pero como consecuencia se aumenta el volumen de información, y por ende el tamaño de los archivos y la velocidad computacional de manejo de los mismos.

En ambos casos, las consideraciones mencionadas deben ser tenidas en cuenta.

Aplicación. Superficies Relevadas

La técnica desarrollada se aplicó para relevar las superficies generadas en el canal a fondo móvil disponible en el Laboratorio de Hidráulica presentado en el CAPÍTULO 2 (Figura 5).

En el CAPÍTULO 3, se determinó a través de una serie de ensayos (se utilizó como configuraciones de referencia, las Geometrías 6 y 8 que se observan en las Figura 55 y Figura 56), lo que se denominó como escenarios factibles. Estos son combinaciones de sección inicial, caudal y pendiente a partir de las cuales es posible alcanzar el equilibrio hidrosedimentológico dentro del dominio útil del canal experimental.

Se relevaron las secciones iniciales (antes de comenzar el experimento) y finales (secciones erosionadas luego de 48 hs de duración del ensayo) de todos los experimentos realizados sobre las geometrías 6 y 8, tanto para secciones iniciales triangulares como trapezoidales.

En la Figura 67 se presenta un ejemplo de una superficie relevada con más de 4.000.000 de puntos. En la misma se observa la información obtenida (la cual parece una mancha sólida) y un zoom sobre la misma donde claramente se aprecia la ausencia de regularidad en la estructura de la malla.

Con el objetivo de trabajar sobre mallas regulares, una alternativa es la interpolación. A la derecha de la misma imagen se observa el mismo relevamiento en formato raster. Para obtenerlo, lo que se realizó fue una interpolación lineal sobre una malla regular.

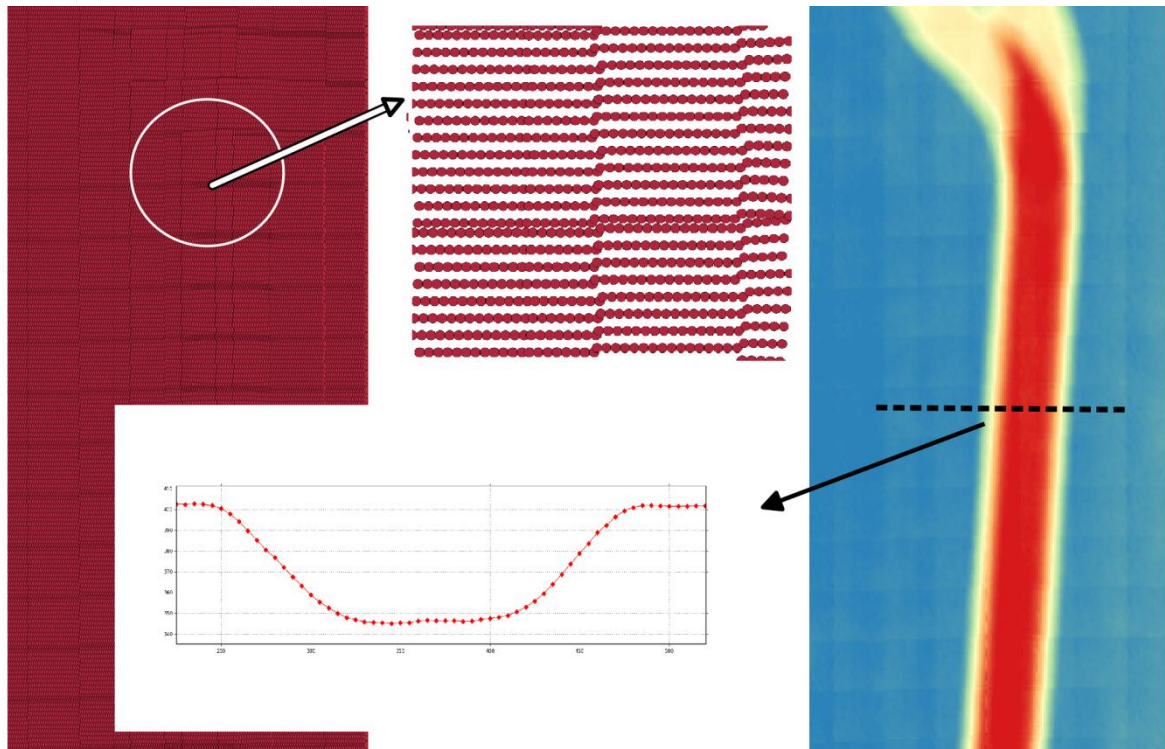


Figura 67: Esquema de procesamiento de datos para facilitar la manipulación de la información.

De esta manera se facilita la manipulación de las matrices de datos ya que el tamaño del pixel es homogéneo. Se considera que en este procedimiento la pérdida de calidad en la información debido a la interpolación es despreciable dada la densidad de puntos relevados (uno por mm^2 aprox.).

En la Figura 68, se observa un relevamiento realizado sobre el experimento correspondiente a la geometría 8 triangular, con una pendiente de 1.2%, un caudal de 0.10 l/s y una duración del ensayo de 40 hs.

Con la aplicación de la técnica desarrollada se relevaron las superficies iniciales y finales de 17 experimentos (aquellos en los que se alcanzó el equilibrio hidrosedimentológico y que se observan en la Tabla 9). En todos los casos se obtuvieron modelos digitales de elevación que superan los 4.000.000 de puntos, abarcando una superficie de 1.10 x 3.50 metros aproximadamente (ANEXO IV). El tiempo promedio que ha demandado cada relevamiento, entre la tarea en el canal experimental y el procesamiento de la información es de 3.5 hs, lo que sumado al volumen y calidad de la información, hacen de esta técnica un procedimiento sumamente eficiente a la hora de realizar relevamientos topográficos a escala de laboratorio.

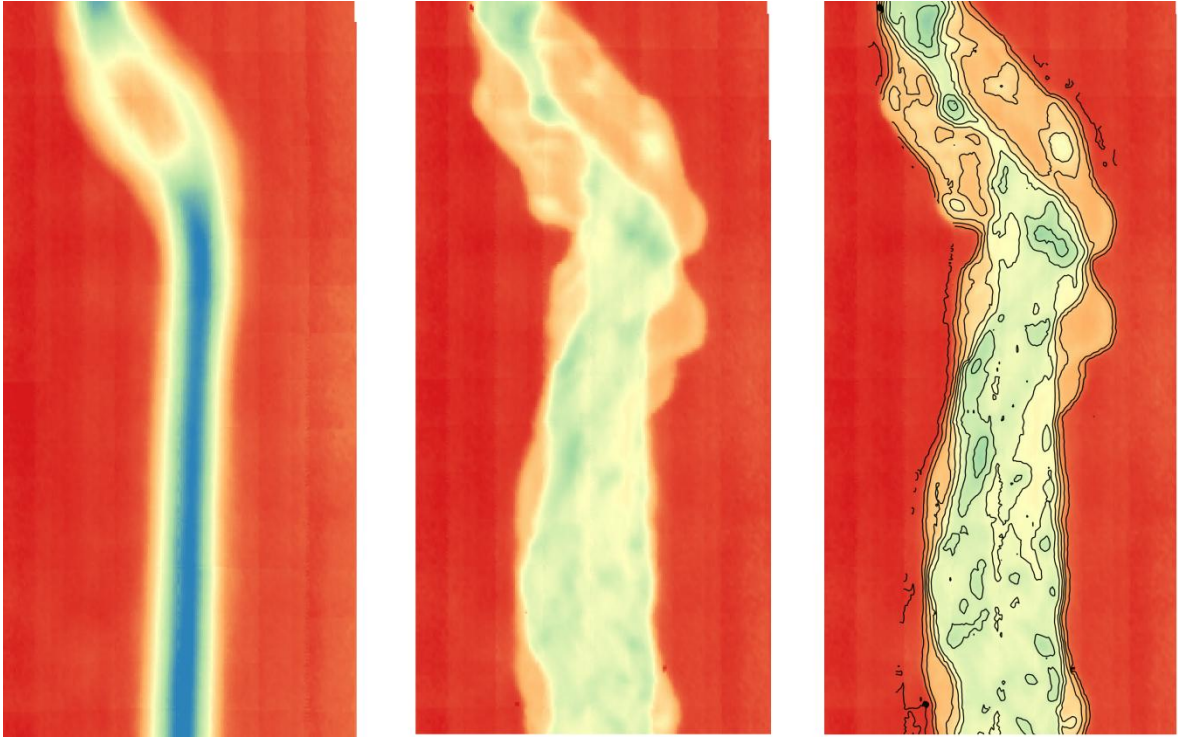


Figura 68: A la izquierda, relevamiento previo al comienzo el experimento, al centro el relevamiento de la geometría luego de culminado el experimento y a la derecha se adicionaron las curvas de nivel

CAPÍTULO 5

Técnica No Intrusiva para la Medición de la Evolución Temporal y Espacial de un Cauce Aluvial en el canal Experimental

Se ha presentado en capítulos anteriores a los sensores de movimiento como posible alternativa para realizar relevamientos planialtimétricos sobre lechos aluviales a escala de laboratorio. En particular se ha utilizado el sensor XtionPro Live de ASUS y conforme a las experiencias presentadas por otros autores, se presentó en el capítulo anterior una técnica que permite realizar relevamientos de grandes superficies (siempre a escala de laboratorio) a través de un proceso de concatenación.

En vista de los satisfactorios resultados obtenidos, se decide comenzar a investigar la capacidad del sensor de medir a través del agua. El objetivo planteado es el de desarrollar un procedimiento que permita medir procesos morfológicos evolutivos con niveles de calidad en la información obtenida comparables a los relevamientos en seco, y con la particular cualidad de ser no intrusivo.

Medición a través del agua con un sensor de movimiento

Mediciones controladas con agua filtrada

En base al trabajo presentado por Mankoff y Russo (2012), se sabe que estos sensores poseen la habilidad de medir a través del agua y que la información obtenida requiere de cierta corrección ya que el valor de profundidad a un mismo mensurando varía en función de la profundidad del fluido.

Para corroborar los resultados obtenidos por los autores mencionados, se construyó un recipiente prismático a partir del cual es posible realizar mediciones controladas (Figura 69).

El fondo del recipiente, es una superficie plana y opaca, la cual puede ser horizontalizada con el sistema de montaje del recipiente.

Se realizaron mediciones sin agua (medición de control), con 25, 50, 100, 150, 200 y 250 mm de profundidad, valores que son compatibles con los habitualmente utilizados en el canal experimental disponible en el Laboratorio de Hidráulica de la FRC – UTN.



Figura 69: Recipiente prismático de vidrio construido para realizar mediciones controladas a través de agua con el sensor de movimiento

En la Figura 70 se presentan a modo de ejemplo las mediciones de la superficie sin agua (de control), con 25 y 50 mm. En todos los casos ensayados se logró medir la superficie, y tal como se observa en la gráfica de la misma figura, las mediciones sufren una distorsión que varía en función de la profundidad del flujo.

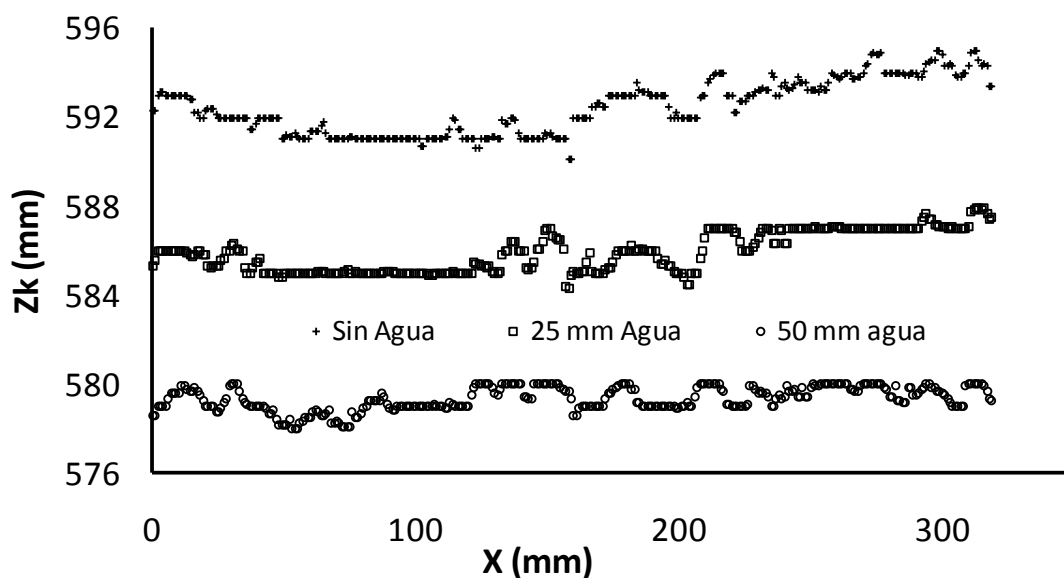


Figura 70: mediciones de una superficie plana horizontal con diferentes niveles de profundidad de agua

Errores en las mediciones. Modelo de corrección

La distorsión observada anteriormente equivale a decir que la medición se realiza sobre un fondo aparente con lo que se infiere que también existe una profundidad de agua aparente llamada h_p (Figura 71). Para poder calibrar las mediciones que se realizan bajo el agua es necesario determinar una ecuación que ajuste el error sistemático que se genera.

Llamando Z_k a la medición de referencia (medición sin agua), Z_w a la medición con una determinada profundidad de agua, h a la profundidad del fluido y P a la distancia entre el plano de medición de la cámara infrarroja al pelo de agua (Figura 71), es posible determinar el error (e) de la siguiente manera:

$$e = Z_k - Z_w \quad [17]$$

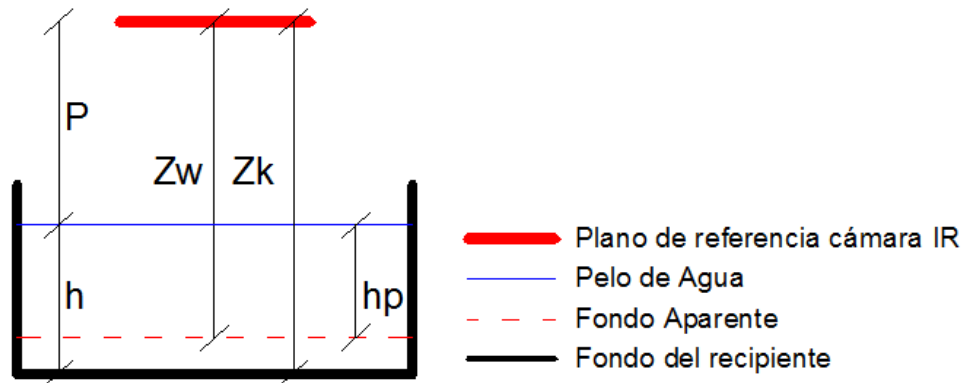


Figura 71: definición de las variables que intervienen en las mediciones a través del agua

En base a numerosas mediciones realizadas, se observa que el valor de Z_w varía con la profundidad del flujo h , o lo que es equivalente, e (ecuación 17) varía con la profundidad del flujo. Para conocer la forma de la variación mencionada, se realizó una gran cantidad de mediciones sobre un mismo mensurando (superficie plana horizontal) con diferentes niveles de agua, y a partir de esta información se calculó el valor del error e para cada situación, logrando de esta manera ajustar la curva que se observa en la Figura 72.

Esta curva demuestra que la distorsión que se genera depende de la profundidad del flujo y esa dependencia es lineal, pero carece de utilidad práctica, ya que cuando se realizan mediciones en el canal la incógnita es el valor de h .

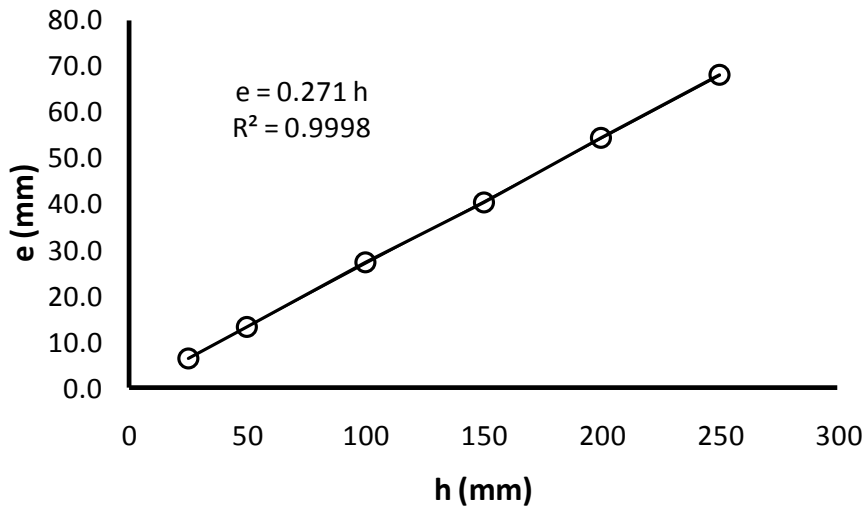


Figura 72: variación del error e en función de la profundidad de agua

Teniendo en cuenta que en las mediciones que se pudieran realizar en un equipo experimental no existe un valor de control o referencia, lo que se obtendría en forma directa es el valor de Z_w . Para resolver este inconveniente, se determinó experimentalmente una curva que relaciona los valores de h con h_p (Figura 73, el valor de R^2 está redondeado a la quinta cifra decimal). De esta manera, conocido el valor de P, es posible independizarse de la superficie plana horizontal y calibrar mediciones realizadas en donde no se conoce la profundidad del flujo, situación que se ve reflejada cuando se pretende medir la evolución temporal del cauce.

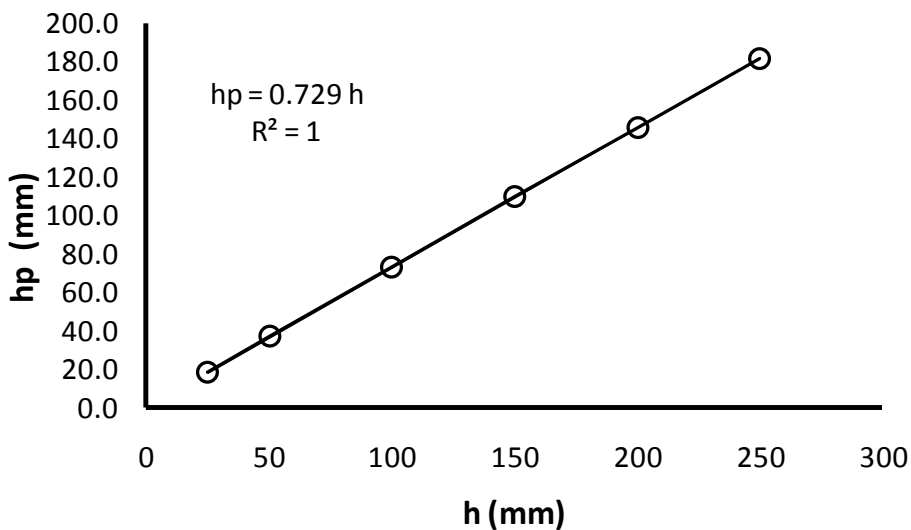


Figura 73: relación entre h y hp

Medición con distintos niveles de turbidez

Técnica para determinar el nivel de turbidez a través del análisis de imágenes

En todas las mediciones realizadas a partir de las cuales se extrajo la información para las deducciones mencionadas y el ajuste de las curvas de las Figura 72 y Figura 73, se utilizó agua previamente filtrada. Esta situación no refleja las condiciones de operación normales del equipo experimental y es por esta razón que se decidió evaluar la capacidad de medición del equipo a través de agua con diferentes niveles de concentración de arcilla (indicador del nivel de turbidez) y profundidades.

Para determinar el dominio de medición indicador de turbidez – profundidad del fluido, se establece un procedimiento, el cual se detalla a continuación:

- a- se llena el recipiente hasta una profundidad de agua conocida y se calcula el volumen.
- b- se coloca una cantidad conocida (en peso) de arcilla al volumen de agua conocido.
- c- se agita el agua con el objeto de que la distribución espacial de la concentración dentro del recipiente sea uniforme.
- d- se procede a realizar la medición
- e- se repiten los pasos b a d, hasta alcanzar una concentración a partir de la cual el sensor deja de registrar debido a la pérdida de señal.
- f- se aumenta la profundidad del flujo y se repiten los pasos a a e

En el desarrollo de este procedimiento se detecta un inconveniente debido a que la turbidez del agua varía con el tiempo producto de la decantación de las partículas de arcilla. Para salvar este inconveniente se desarrolló una técnica que permite evaluar el tiempo a partir del cual la turbidez del agua se mantiene constante.

La técnica mencionada consiste en el análisis de imágenes, o más específicamente, en el estudio de la variación de la intensidad de color de la imagen. Para realizar este experimento se construyó un receptáculo dentro del cual es posible mantener la intensidad de luz constante (Figura 74). Dentro de él se coloca un recipiente con una concentración conocida de arcilla el cual fue previamente agitado y se procede a tomar fotografías cada 30 seg. Durante un período de 15 minutos aproximadamente.



Figura 74: Fotografía tomada en $t = 0$ a la izquierda y en $t = 840$ seg a la derecha

Se realizaron ensayos para concentraciones de 0.8, 2, 4 y 8 gr/l, en donde para cada una de ellas se tomaron 28 fotografías. La hipótesis del análisis es que al mantenerse constante la intensidad del color del agua, la turbidez también lo hace. Cabe mencionar que este no es un análisis cualitativo, sino que la intensidad de color se ha calculado a través de la variación de valor de diversos píxeles de la imagen en cada una de las tres bandas (RGB).

En la Figura 75 se observa la variación de la intensidad de color de la imagen en función del tiempo, y puede apreciarse que a partir de los 500 segundos, este valor permanece relativamente constante.

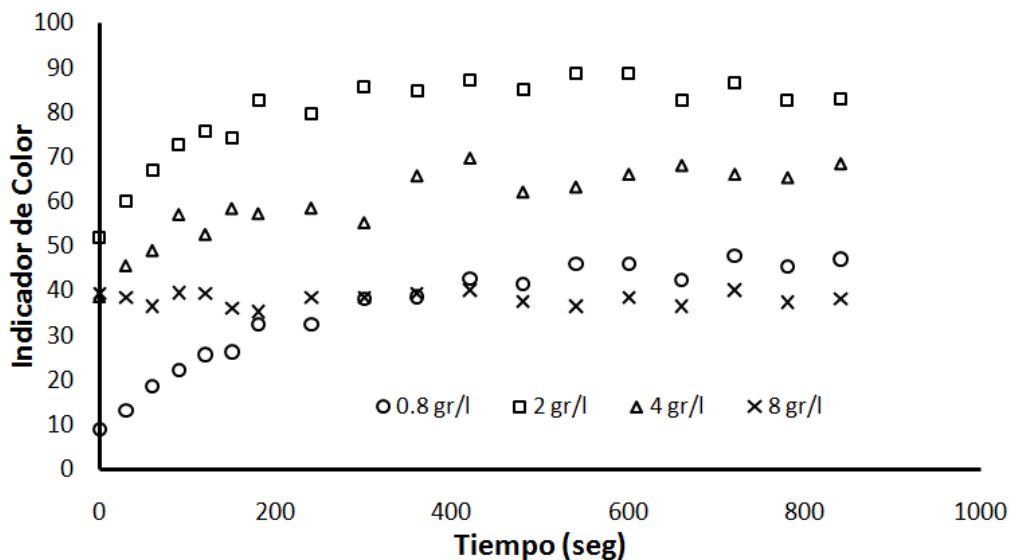


Figura 75.- Variación de la intensidad de color en función del tiempo (ensayo 1)

En base a los resultados obtenidos en estos ensayos, se infiere la necesidad de agregar un paso al procedimiento, el cual consiste en dejar transcurrir un periodo de 500 segundos para que la turbidez se mantenga constante y el ensayo sea repetible. En la Figura 76 se observa la variación de la intensidad de color en función del tiempo para

una determinada concentración en dos ensayos diferentes. Este comportamiento se observa para todas las concentraciones estudiadas, concluyendo en que el experimento es repetible.

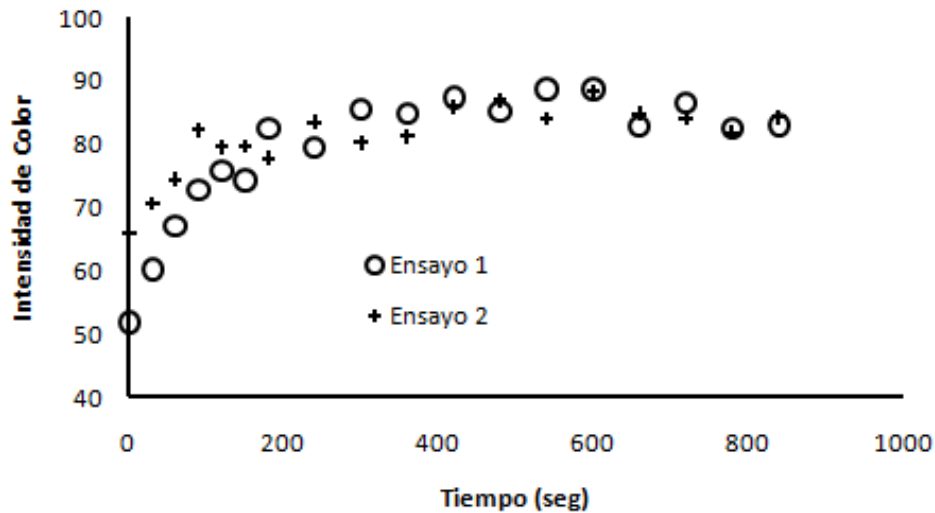


Figura 76.- Comparación de los valores obtenidos en los dos ensayos para la misma concentración de arcilla

Definición del dominio de medición

Una vez definido el intervalo de tiempo anteriormente descrito se procede a medir dentro del recipiente con el sensor de movimiento. Aquí se define una profundidad de flujo (25 mm por ejemplo) y se mide primero con agua filtrada (patrón), luego con una concentración de 0.04 gr/l, 0.06 gr/l, etc, hasta que finalmente se pierde la señal y no es posible seguir midiendo. Se comparan los resultados obtenidos para cada una de las concentraciones y se evalúa la calidad de la medición.

En la Figura 77 se observa la variación del valor medio de Zk en función de la concentración de arcilla para una profundidad de 25 mm. Tal como se esperaba, luego de un determinado valor de concentración (1.6 gr/l) la señal se pierde y el valor medido es erróneo.

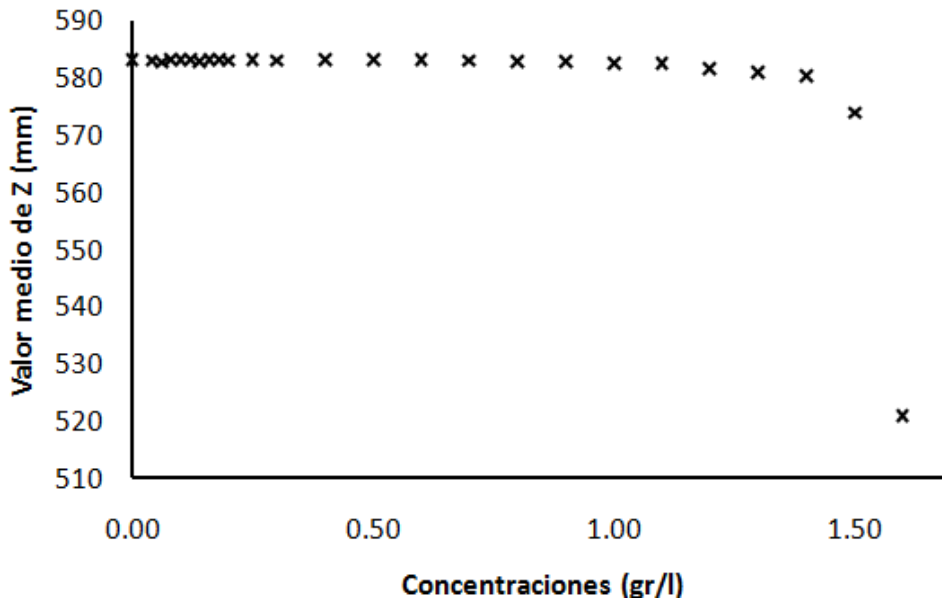


Figura 77.- Variación del valor medio de la profundidad en función de la concentración de arcilla

Con el objetivo de transformar los valores de concentración de arcilla, en unidades de turbidez (en este caso el sensor utilizado expresa los resultados en NTU), se realizaron 14 ensayos en los cuales se midieron los niveles de turbidez para diversas soluciones agua – arcilla, en donde las concentraciones estudiadas fueron compatibles con los ensayos previos (Figura 78).

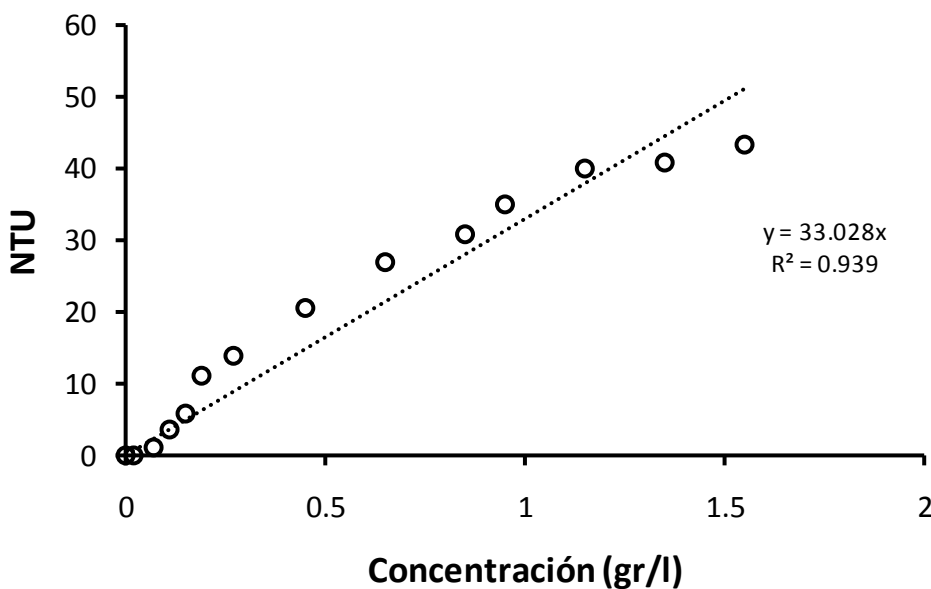


Figura 78: relación entre las concentraciones ensayadas y la turbidez en NTU. En línea punteada se ajustó una línea de tendencia lineal

Lo mismo se repitió para diferentes profundidades, y en todos los casos se estableció el valor límite a partir del cual el instrumento deja de medir. Se realizaron 80 ensayos, en donde finalmente lo que se logró es definir el dominio de combinaciones

profundidad – turbidez a partir del cual el sensor de movimiento deja de medir (Figura 79).

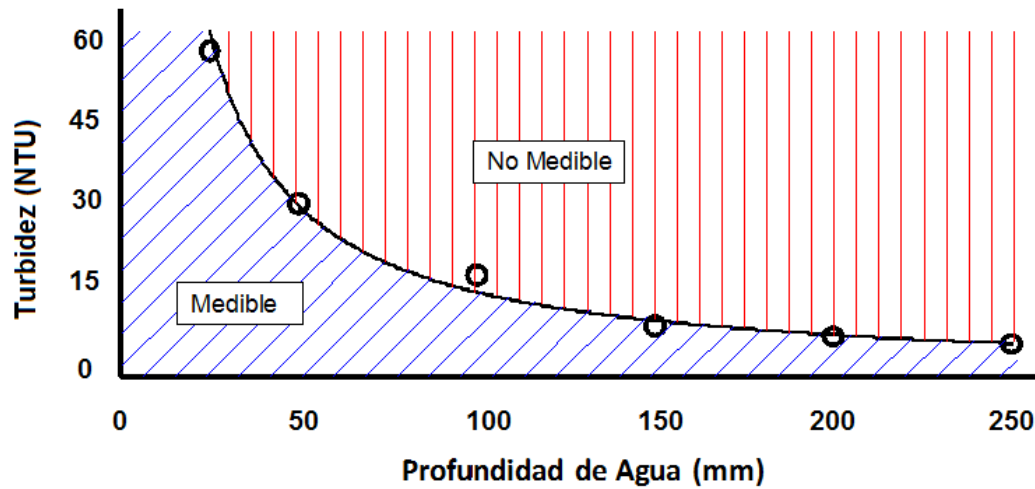


Figura 79.- combinaciones límites de profundidad – turbidez a partir de las cuales el sensor deja de medir

Técnica no intrusiva para la medición de la evolución temporal de cauces aluviales en laboratorio

Para realizar las mediciones a tiempo real es necesario poder realizar capturas cada un intervalo de tiempo determinado durante toda la duración del ensayo. Para ello se escribió un código en Python que permite capturar la profundidad, imágenes infrarrojas (IR) e imágenes RGB, con una frecuencia prefijada por el laboratorista. Como se demostró anteriormente, los valores de Z_w deben ser corregidos debido a la distorsión que se genera al medir a través del agua. Debido a que en los ensayos realizados en canales a fondo móvil no es conocida la profundidad del flujo, el valor de Z_w debe ser corregido a través de la siguiente expresión (Figura 71):

$$Z_k = Z_w + (h - h_p) \quad [18]$$

El valor de Z_w es conocido, y para determinar el valor de h_p , basta con conocer P , el cual no es más que el valor de profundidad correspondiente a la intersección del pelo del agua con el borde del canal (supuesta una superficie libre plana), cuyas coordenadas planimétricas pueden determinarse a través del análisis de las imágenes infrarroja y RGB.

Determinado P , se calcula h_p (ecuación 19) y con la relación de la Figura 73 se infiere el valor de h , calculando el valor de la profundidad real Z_k a través de la ecuación 18.

$$h_p = Z_w - P \quad [19]$$

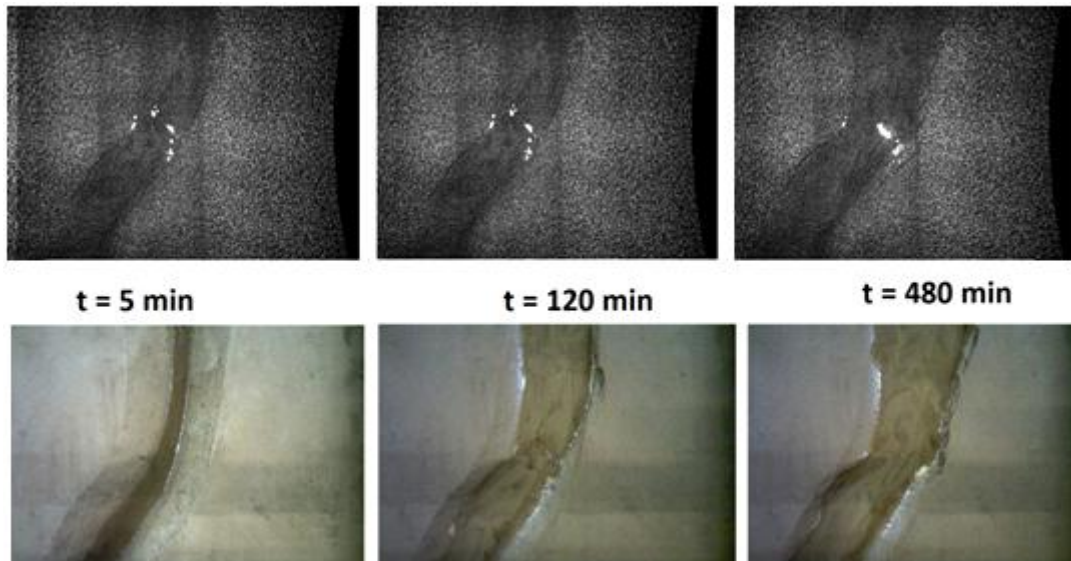


Figura 80: arriba imágenes capturadas con la cámara infrarroja, abajo con la cámara rgb

Dado que la cámara infrarroja (en conjunto con el emisor infrarrojo) es la que se utiliza para determinar la disparidad y a partir de allí los valores de profundidad (Freedman et al, 2010), el modelo digital de elevaciones (MDE) se corresponde pixel a pixel con la imagen infrarroja. Conforme a lo mencionado, es posible inferir el valor de P , determinando las coordenadas i - j de la IR correspondientes a la intersección del pelo de agua con el canal. El inconveniente que esto presenta, es que la IR no es lo suficientemente clara por lo que podría generarse un error en la determinación de mencionadas coordenadas, y por lo tanto en el valor de P . Para solucionar el problema mencionado se utilizará la imagen RGB, en la cual es posible hacer una detección más precisa. La utilización de esta información genera un nuevo inconveniente, ya que las cámaras RGB e IR se encuentran separadas por aproximadamente 2.5 cm, razón por la cual los píxeles no se corresponden.

Para salvar esta diferencia, lo que se debe realizar es una transformación geométrica en la imagen RGB. Existen diversos tipos de transformaciones geométricas, en la Figura 81 se resumen las operaciones o transformaciones básicas 2D que pueden aplicarse a las imágenes (Szeliski, 2010).

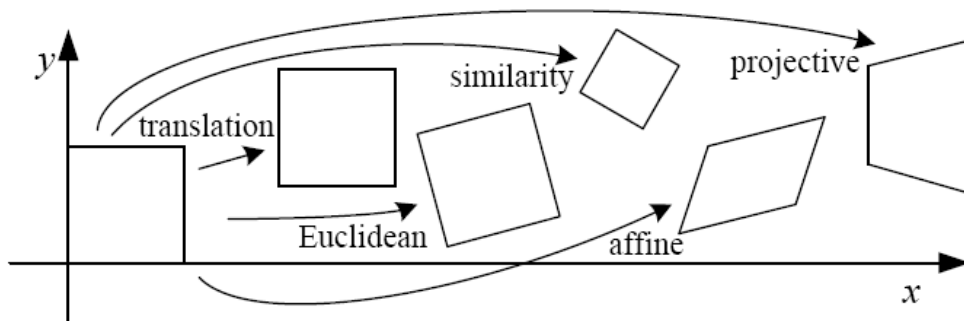


Figura 81: Operaciones o Transformaciones básicas 2D aplicables sobre las imágenes (Szeliski, 2010)

Para el caso de estudio, es necesario realizar una traslación y rotación sobre la imagen RGB con el fin de lograr correspondencia pixel a pixel con la IR, y por ende con el MDE. Esta operación es conocida como movimiento 2D de cuerpo rígido y puede expresarse matemáticamente como:

$$x' = Rx + t \quad [20]$$

Donde x' es la imagen transformada, x la imagen original, R la matriz de rotación y t la matriz de traslación. Matricialmente puede expresarse como se observa en la Ecuación 21.

$$x' = [R \ t] x \quad [21]$$

Donde:

$$t = \begin{bmatrix} 1 & 0 & t_x \\ 0 & 1 & t_y \end{bmatrix}$$

$$R = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}$$

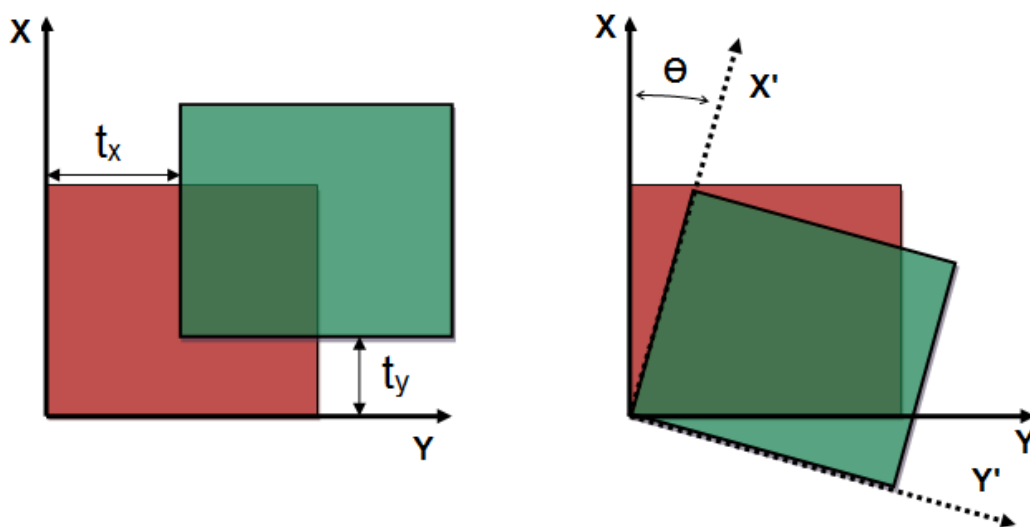


Figura 82: representación gráfica de la ecuación 21. Rotación y traslación aplicadas a una imagen

Para la determinación de las matrices de traslación y rotación, basta con conocer las coordenadas de 4 puntos que se correspondan en las imágenes (Figura 83).

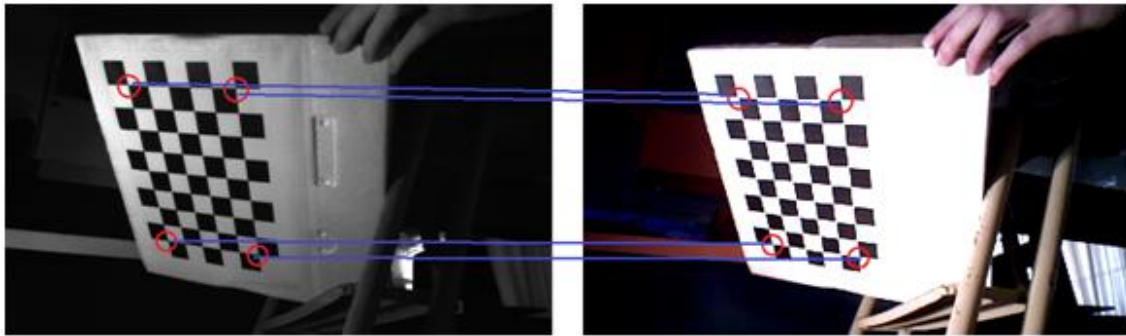


Figura 83: Transformación geométrica. A la izquierda imagen IR en escala de grises, a la derecha la RGB.

Se escribió un código en Python que permite realizar esta transformación en forma automática, y a su vez, en forma interactiva es posible determinar los puntos correspondientes al borde del pelo de agua (Figura 84).



Figura 84: .Imagen RGB rectificada con los puntos para determinar P

El programa entrega como salida una imagen RGB rectificada y una lista donde se encuentran las coordenadas $i-j$ de los puntos que se definieron (P_{ij}) para determinar el valor de P .

En la presente serie de experimentos realizados se determinaron 10 P_{ij} por cada imagen. Con estas coordenadas y la correspondencia existente con el MDE, se buscan los valores de Z_k de la intersección del pelo de agua con el borde del canal (para esta situación Z_k es igual a P), y asumiendo que esta superficie es plana (lo cual es válido en el dominio de trabajo), se ajusta un plano por regresión lineal múltiple, que modela la superficie del cuerpo de agua (Figura 85).

Cabe mencionar que la determinación de los 10 puntos en forma interactiva, para realizar el ajuste del plano que modela el cuerpo de agua, demandó para las 152 imágenes un tiempo de 45 minutos aproximadamente (estas 152 imágenes se corresponden con un ensayo de 48 hs de duración).

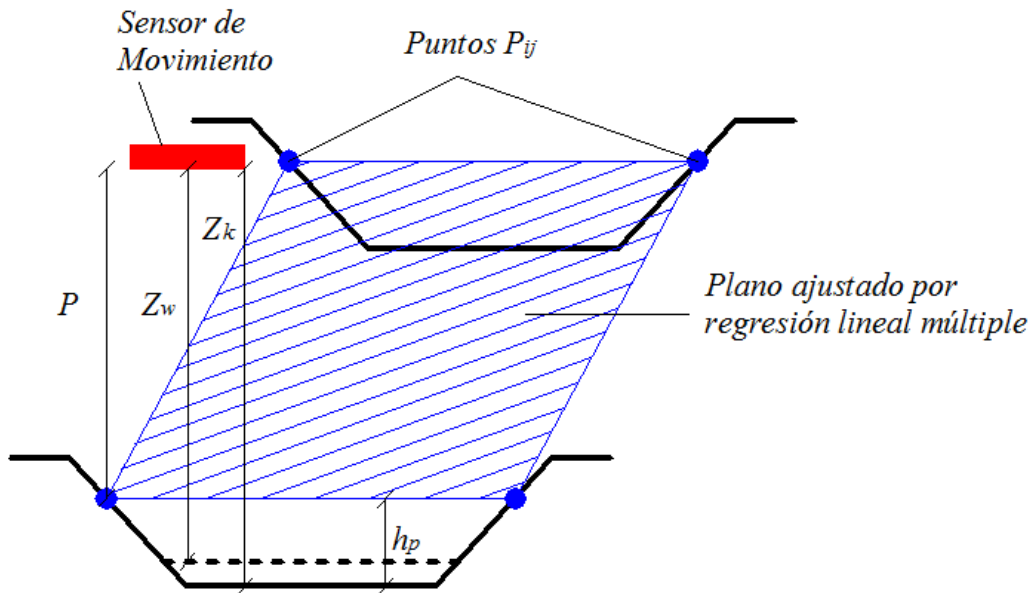


Figura 85: modelo de un plano que representa la superficie del cuerpo de agua

De esta manera, lo que hasta aquí era un valor P , ahora se transforma en un plano. Si a cada celda $i-j$ del MDE se le resta el valor correspondiente de P_{ij} , tres resultados son posibles, el primero es que el valor sea negativo, lo que indica que esa celda no se encuentra sumergida, por lo que el valor de Z_w es igual a Z_k ; que esa diferencia sea igual a cero, en cuyo caso es la intersección del pelo de agua con el borde y el valor no debe ser corregido; y finalmente que el valor sea positivo, en tal caso el punto se encuentra sumergido y se debe corregir aplicando las ecuaciones 18, 19 y el gráfico de la Figura 73.

Aplicación a un modelo Físico

Se mostrarán los resultados obtenidos producto de la aplicación de la técnica en un ensayo de 40 hs de duración, donde la geometría inicial trazada es la que se observa en la Figura 86, con un caudal de 0.15 l/s y una pendiente de 0.6 %.

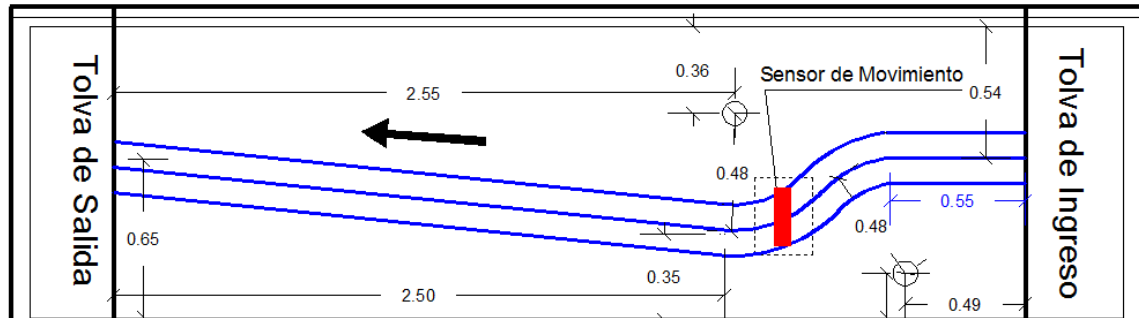


Figura 86.- geometría de la sección inicial ensayada, las dimensiones se encuentran en metros. En línea de trazo el sector de captura

El sensor de movimiento se ubicó en la zona donde se trazó la curva (Figura 86) y se capturaron más de 1500 imágenes RGB, IR y MDE, ya que cada imagen resultante se conforma como promedio de 10. Durante la primer hora, las capturas se realizaron cada 5 minutos, en las siguientes 5 horas, cada 10 minutos y de ahí en más cada 20 minutos. De esta manera se logró obtener una historia evolutiva del MDE. En la Figura 87, se graficó la variación temporal de la coordenada Z_k de tres puntos, y en la misma es posible observar que luego de los 1500 minutos (40 hs aprox.) los valores se mantienen relativamente constantes, lo que sería un indicativo de que se ha llegado a un equilibrio hidrosedimentológico.

En la Figura 88 se observa la evolución del MDE para $t = 5$ min., $t = 6$ hs y $t = 40$ hs. En cada una de las gráficas se han trazado las curvas hipsométricas de la topografía relevada con la técnica propuesta.

En la Figura 89, se muestran las curvas de nivel correspondientes de la batimetría relevada a 6 hs de comenzado el ensayo. En la columna de la izquierda, el MDE producto de las mediciones sin corregir, en la central el corregido, y a la derecha se encuentran las isolineas de las correcciones realizadas. Como era de esperar, en las zonas donde se producen las hoyas de erosión las correcciones alcanzan los máximos valores, de hasta 8 mm, para una profundidad de flujo de 30 mm aproximadamente.

En todos los casos, y según la pendiente de la recta de la Figura 72, el error es el 27.1 % de la profundidad del flujo.

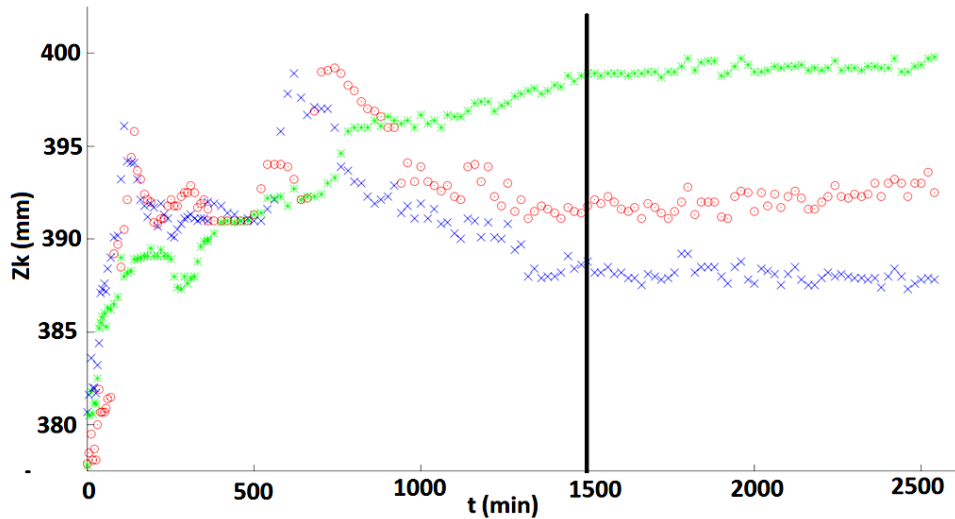


Figura 87.- Evolución temporal de la coordenada Zk, de tres puntos que se encuentran dentro del canal

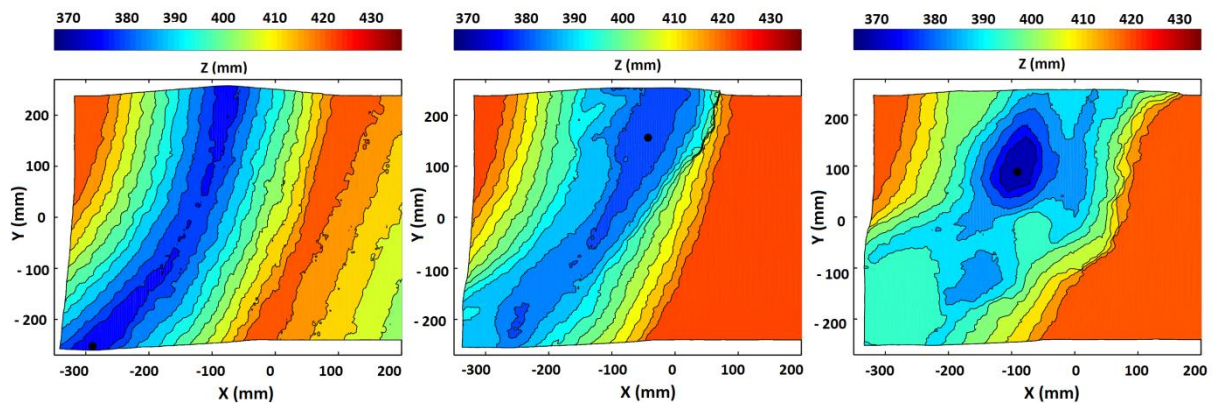


Figura 88.- a la izquierda las curvas hipsométricas de la sección al comenzar el ensayo, al centro a la hora de comenzado el ensayo y a la derecha a las 40 hs.

La aplicación de esta técnica a modelos físicos a fondo móvil, permite realizar mediciones a tiempo real que hasta el momento no se habían logrado realizar de forma no intrusiva, o no al menos con los costos aquí propuestos. Estas mediciones, permiten cuantificar la evolución topográfica y morfológica del cauce lo que podría ser de gran utilidad en la calibración de diversos modelos de la hidráulica fluvial.

Las gráficas realizadas a partir de la información obtenida con la aplicación de la técnica expuesta se encuentran en el ANEXO V.

CURVAS DE NIVEL DEM SIN CORREGIR CURVAS DE NIVEL DEM CORREGIDO ISOLINEAS DE CORRECCIONES

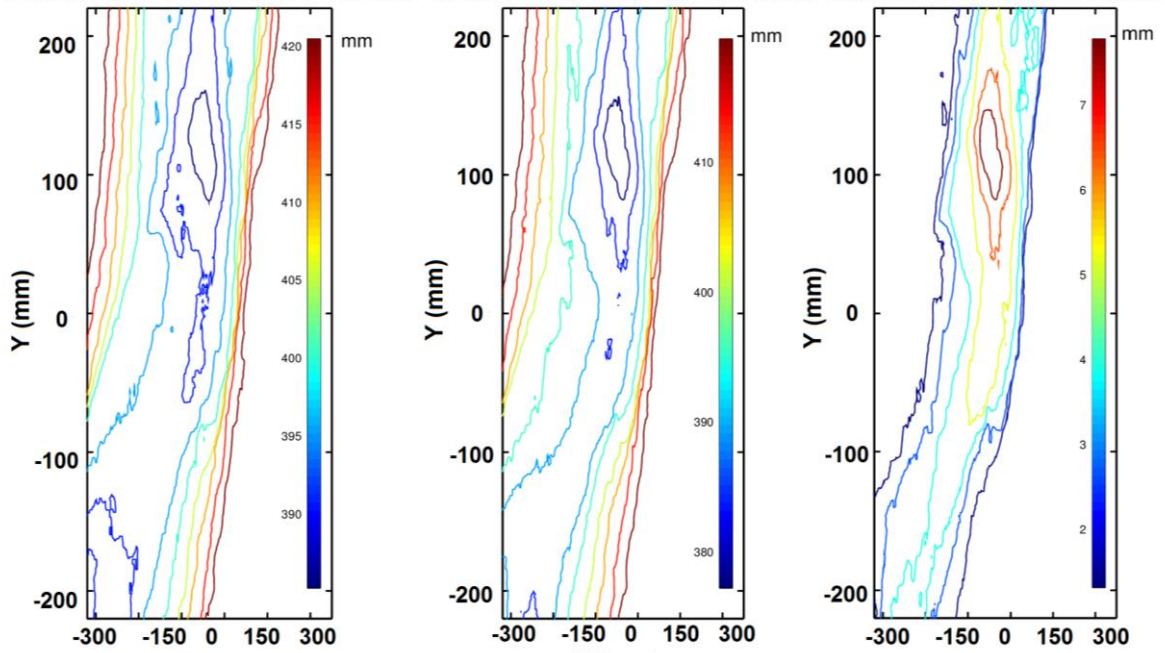


Figura 89.- isocurvas de los valores medidos a las 6 hs y de ensayo, a la izquierda las correspondientes a las mediciones sin corregir, al centro las corregidas y a la derecha las isocurvas de las correcciones realizadas.

CAPÍTULO 6

Discusión y Resultados

En el presente capítulo se expondrán y discutirán resultados obtenidos a partir de la información recabada producto de la aplicación de las técnicas desarrolladas en los dos capítulos previos.

Tal como se explicó en el CAPÍTULO 4, se desarrolló una técnica que permite realizar relevamientos topográficos a escala de laboratorio con un sensor de movimiento. Esta técnica fue aplicada para relevar los experimentos que se describieron en el CAPÍTULO 3. En todos los casos se obtuvieron MDE con más de 4.000.000 de puntos.

En la Figura 90 se observa uno de los relevamientos realizados (Geometría 6, pendiente 1.2 % y un caudal de 0.14 l/s). En el mismo se ha simulado a través de una herramienta GIS (para esta tarea se utilizó Global Mapper) distintos niveles de inundación, con lo cual es posible determinar, entre otras cosas, la posición de hoyas de erosión, su profundidad, etc.

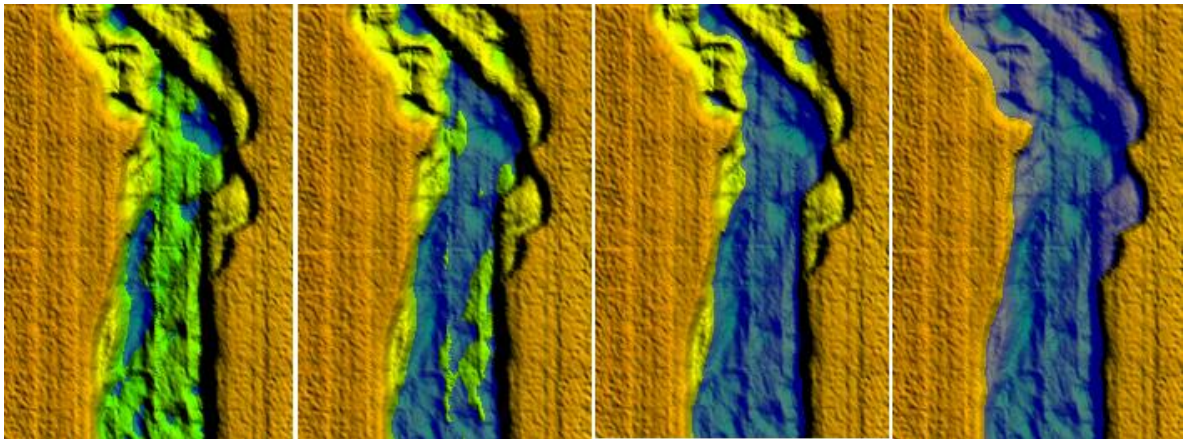


Figura 90: la primer imagen (de izquierda a derecha) corresponde a la sección erosionada con 5 mm de agua, la segunda con 10, la tercera con 15 y con 25 la última.

Tal como se mencionó anteriormente, poder generar un raster a partir del modelo digital de elevaciones, facilita la manipulación de la información.

En la Figura 91 se observan, en el formato mencionado, la sección previa al comienzo del experimento y la sección luego de 40 hs de ensayo aproximadamente. En la misma se ha trazado un perfil, el cual se graficó a la derecha de la misma figura. Claramente se puede apreciar la sección inicial, la final, y con líneas inclinadas el área erosionada y con líneas horizontales el sector donde se ha depositado sedimento.

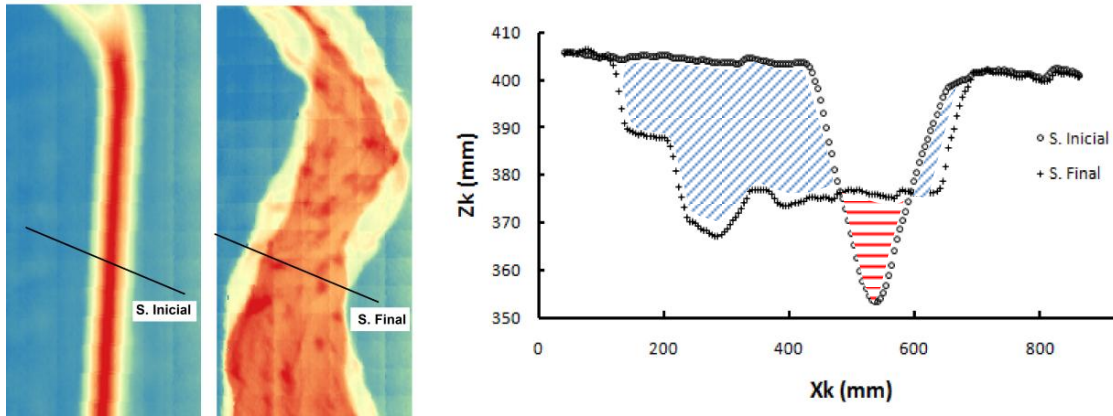


Figura 91: a la izquierda una imagen rasterizada de la sección inicial y erosionada, y a la derecha la gráfica de los perfiles que se indican

La identificación de estos sectores (erosionados y sedimentados), es una tarea que, con los métodos tradicionales utilizados para los relevamientos topográficos en laboratorio, debe realizarse en cada uno de los perfiles relevados. A partir de allí, y conocida la distancia promedio que separa a dos secciones consecutivas, es posible estimar los volúmenes de sedimento depositado y/o erosionado. Claramente, esta técnica no tiene en cuenta lo que sucede entre estas dos secciones, y los valores obtenidos dependerán de la distancia entre estas secciones, la densidad de puntos relevados en cada una de ellas y la irregularidad del lecho.

Cuando se trabaja con modelos digitales de elevación, el cálculo de los volúmenes mencionados no es más que una simple operación matemática, en este caso una resta entre las dos imágenes raster, la inicial y la final. Esta resta puede ser interpretada como la diferencia o variación que se ha producido durante el ensayo.

En la Figura 92 se graficaron los valores de volumen erosionado en función de la pendiente general del cauce. Cada una de las series de datos corresponde a un determinado caudal de ensayo. Tal como se observa el volumen erosionado aumenta en forma no lineal con la pendiente para un determinado caudal y tamaño del sedimento (como ya se ha mencionado en el CAPÍTULO 2 $d_{50} = 0.296$ mm).

En forma similar, y con la ayuda de una herramienta GIS (se utilizó para el presente trabajo la herramienta QGIS), se determinó la longitud del ancho del cauce. Para cada experimento, se definieron 8 secciones transversales distribuidas en toda la longitud (prudencialmente alejadas de los extremos), para las cuales se midió el ancho superficial, y finalmente se calculó un promedio entre ellas.

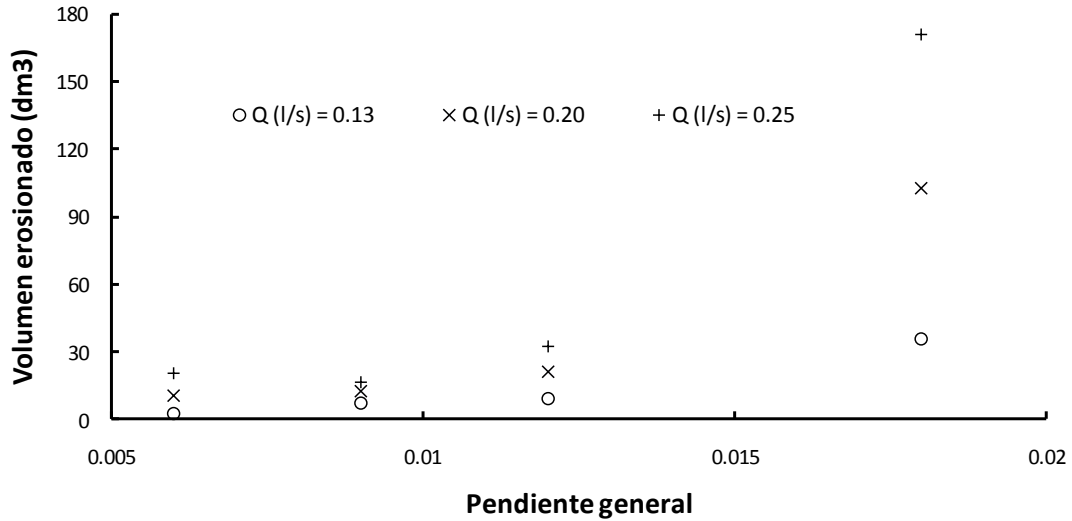


Figura 92: variación del volumen erosionado en función de la pendiente general del cauce

En la grafica de la Figura 93 representa los valores de ancho superficial vs el caudal líquido, para tres pendientes diferentes. Nuevamente, la facilidad y fiabilidad con la que se obtuvieron estos valores no se podría lograr con los métodos tradicionales, o no al menos en tiempos de relevamiento razonables.

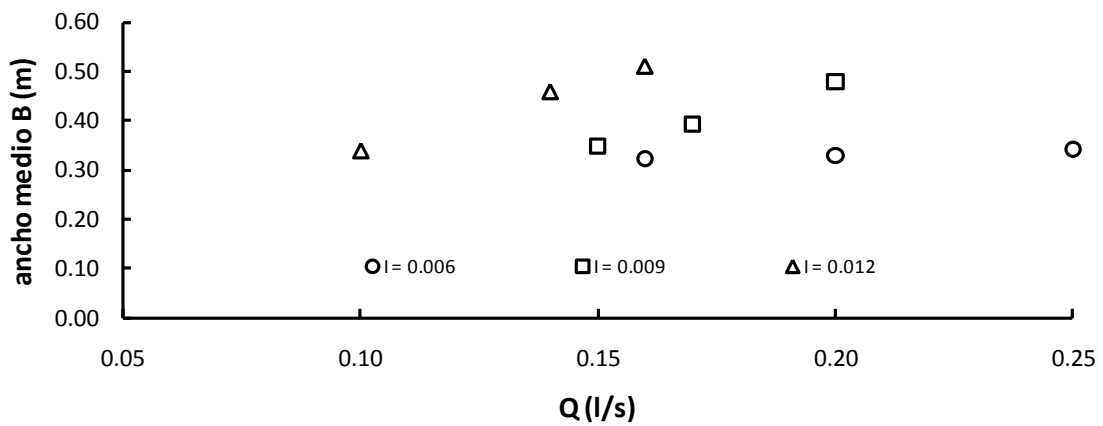


Figura 93: ancho superficial B en función del caudal líquido para tres de las pendientes ensayadas.

Finalmente se realizó un levantamiento planialtimétrico con un distanciómetro laser y con el sensor de movimiento, tanto para la geometría inicial (previo al paso del agua) como en la geometría erosionada, con el fin de comparar la información relevada con cada metodología. Para el levantamiento con distanciómetro se tomaron puntos equidistantes cada 1 cm, y con el sensor de movimiento la altura de captura de la cámara fue de 60 cm, obteniendo una resolución de 1mm x 1mm aproximadamente con esta última.

En la Figura 94 se observan los resultados de los relevamientos realizados para las secciones inicial y final.

En ambos casos se calculó el perímetro y el área correspondientes con los datos obtenidos por ambas técnicas, obteniendo una diferencia del 7% en el primer caso y del 2.5% en el segundo.

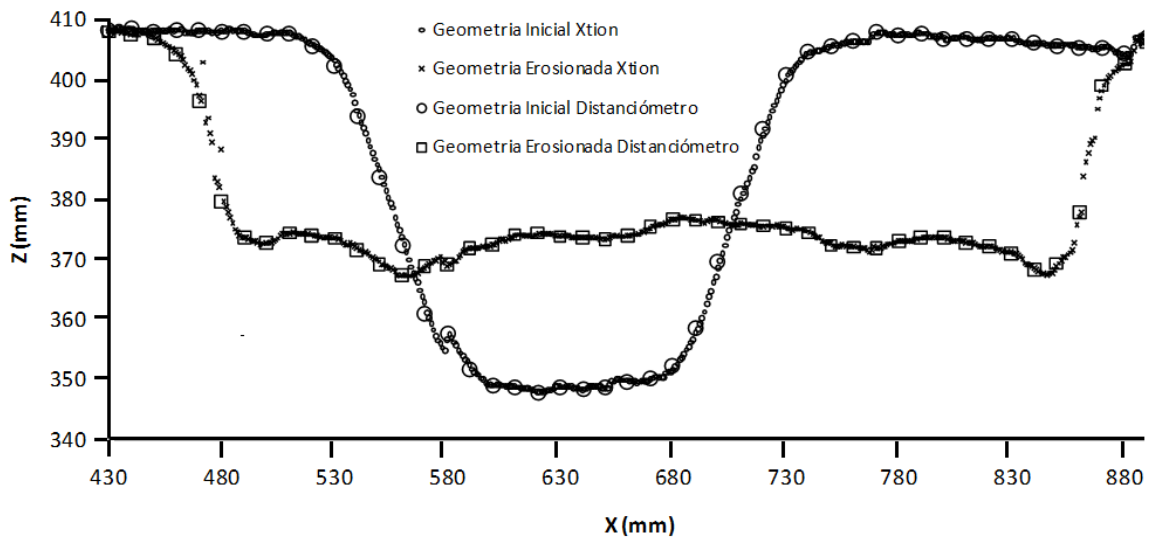


Figura 94: Sección transversal del canal relevado con sensor de movimiento y distanciómetro laser

El área relevada con el sensor de movimiento (una sola imagen sin concatenar) fue de 24 x 32 cm obteniendo 76.800 puntos, y con el distanciómetro se relevaron 3 perfiles con un total de 50 puntos cada uno. En el primer caso el tiempo empleado para realizar las capturas y el procesamiento de datos fue de algunos minutos, mientras que en el segundo se empleó un tiempo de 2 hs aproximadamente.

Como se ha visto en el CAPÍTULO 5, estos sensores de movimiento, también poseen la capacidad de medir a través del agua. En base a esa habilidad se realizaron una serie de ensayos (Tabla 10) en los cuales se realizaron mediciones de tipo evolutivas.

Tabla 10: Experimentos sobre los cuales se realizaron mediciones evolutivas

Nº Geometría	Caudal (l/s)	Pendiente (%)
6	0.16	0.6
	0.2	0.6
	0.25	0.6
	0.15	0.9
	0.2	0.9
	0.08	1.2
	0.16	1.2
	0.15	1.8

Es decir, se programó al sensor para que realice mediciones cada un determinado período de tiempo (constante o no) durante toda la duración del ensayo, sobre el mismo sector.

En la Figura 95 se observa la evolución de tres perfiles normales al cauce (P1, P2 y P3), para $t = 5 \text{ min.}$, $t = 6 \text{ hs}$ y $t = 40 \text{ hs}$. En cada una de las gráficas se ha trazado en azul los puntos correspondientes a las mediciones sin corregir, y en rojo los puntos corregidos. Tal como se observa sólo en la zona sumergida, los puntos difieren de lo medido, producto de la corrección realizada, no así en el resto del MDE.

En la Figura 96, se muestran las curvas de nivel evolutivas, correspondientes a los mismos instantes de tiempos observados anteriormente. En la columna de la izquierda, las isoclinas de los MDE producto de las mediciones sin corregir, en la central aquellos que fueron corregidos, y a la derecha se encuentran las isoclinas de las correcciones realizadas. Como era de esperar, en las zonas donde se producen las hoyas de erosión las correcciones alcanzan los máximos valores, de hasta 8 mm, para una profundidad de flujo de 30 mm aproximadamente.

En la Figura 87 del CAPÍTULO 5 se graficó la evolución del valor de la profundidad para tres píxeles arbitrarios, y en la misma se observó que luego de un determinado tiempo, el valor se mantiene relativamente constante, lo que podría indicar que la variación del lecho ha cesado y se ha alcanzado un estado de equilibrio hidrosedimentológico.

Lo mencionado concuerda con lo que se observa en la Figura 97, donde se ha representado para cada instante de tiempo el volumen acumulado de sedimento que el sistema ha demandado para modificar su geometría. Para el cálculo de este parámetro se debe realizar una diferencia entre el MDE de un instante determinado de tiempo, y el anterior, y multiplicar a cada pixel por el área que representa y finalmente acumular los valores obtenidos. Nuevamente se observa que a partir de los 1500 minutos (25 hs) estos valores tienden a una asíntota, lo que nuevamente podría indicar que se ha alcanzado el equilibrio hidrosedimentológico.

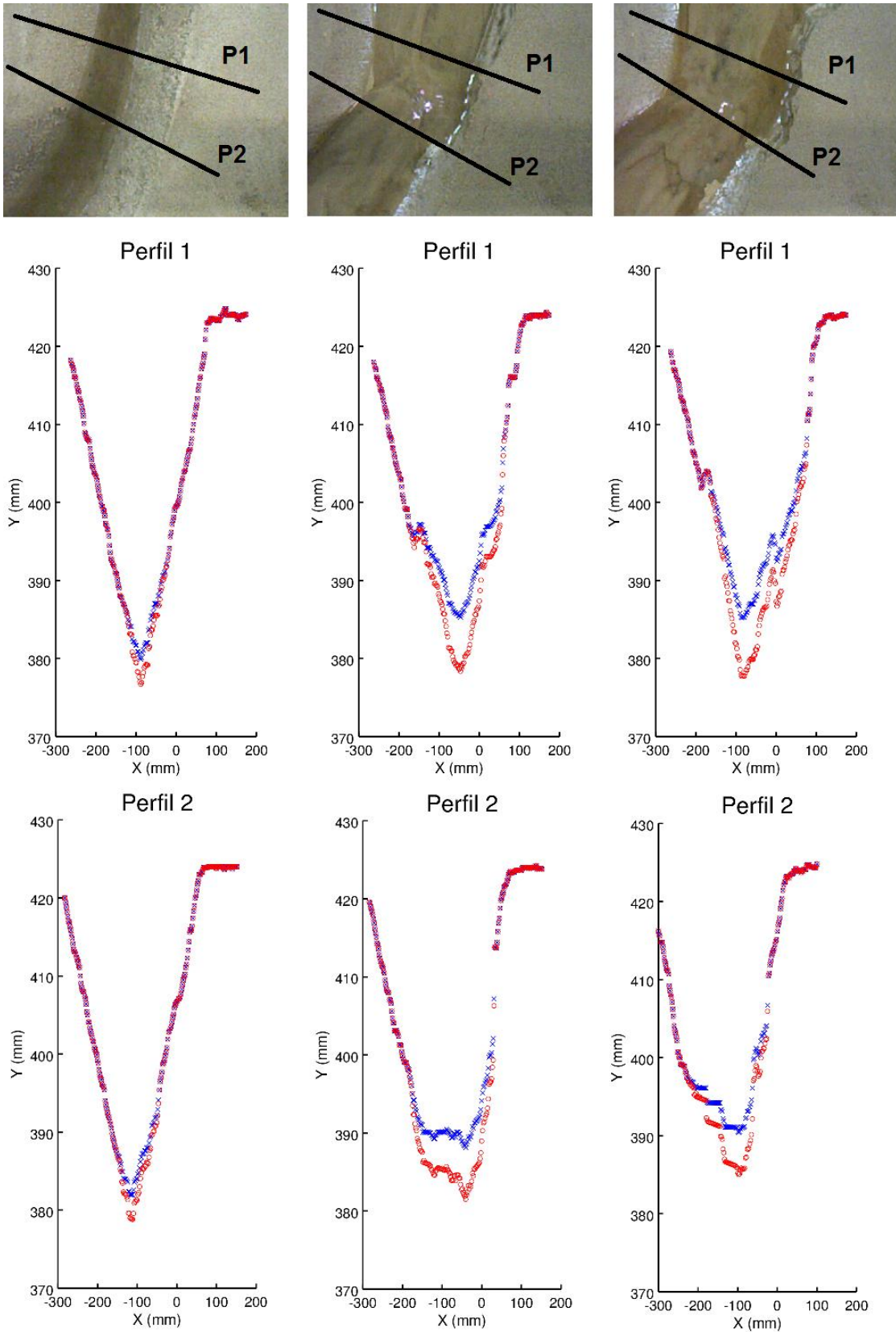


Figura 95.- en la columna de la izquierda, la imagen RGB y los perfiles señalados a los 5 minutos de ensayo, en la central a las 6 hs y a la derecha a las 40 hs. En todos los casos los puntos azules son sin corregir y los rojos corregidos.

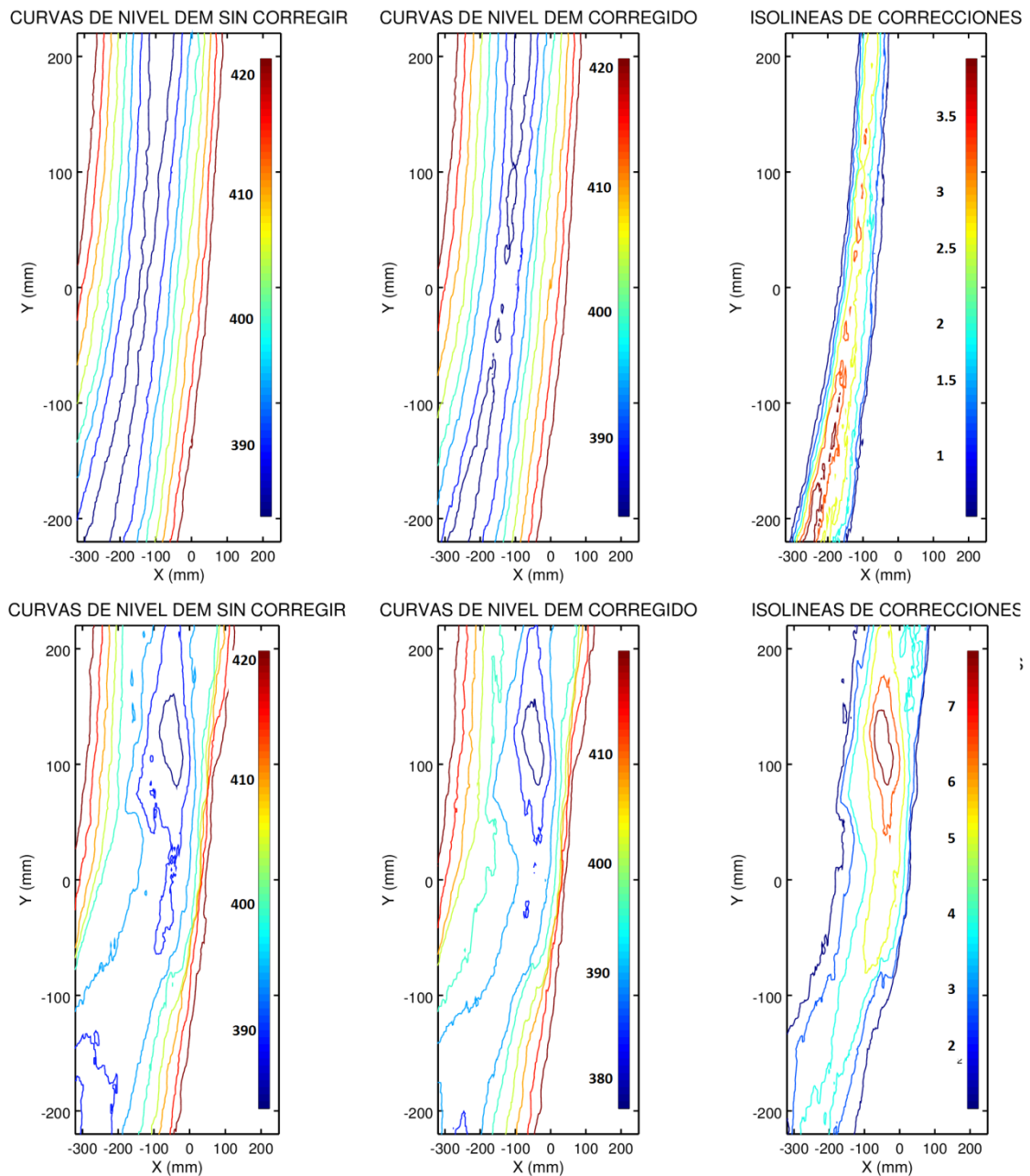


Figura 96.- En la primera fila se encuentran las isolneas de los valores medidos a los 5 minutos del comienzo del ensayo, y en la segunda fila a las 40 hs de ensayo.

En las mediciones que se realizaron a tiempo real, es posible definir dos conjuntos de puntos, el primero compuesto por todos aquellos pixeles que no fueron corregidos (que no se encuentran bajo el agua) y el segundo por aquellos sumergidos.

Asumiendo la hipótesis de que se alcanzó el equilibrio hidrosedimentológico, es posible realizar una medición mientras fluye agua en el canal, drenarlo, volver a medir (ahora sin agua) y comparar los resultados. De esta manera, y teniendo presente de que en esta oportunidad no existe una superficie de referencia, es posible realizar la validación de las mediciones realizadas con la aplicación de la técnica.

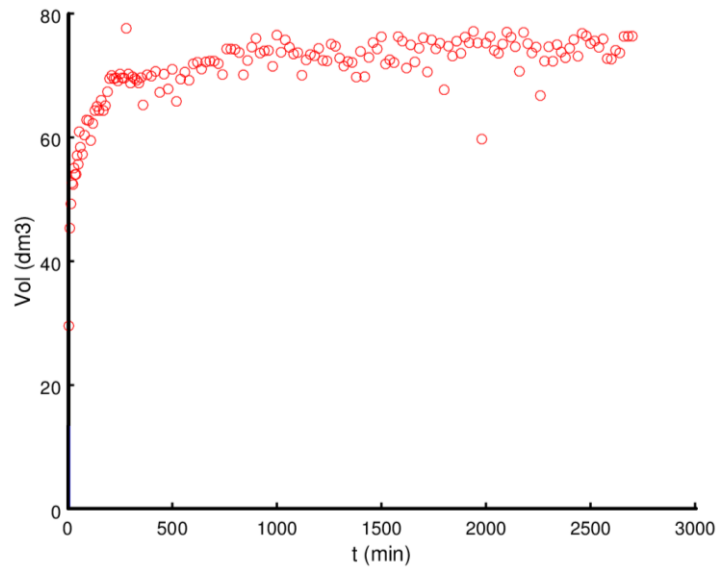


Figura 97: Evolución del volumen erosionado en la zona sumergida de la captura

Ya se evaluó la calidad de las mediciones, realizando un análisis estadístico detallado sobre los datos obtenidos en mediciones realizadas sobre una superficie de control (superficie plana horizontal). En esa oportunidad, se determinó que en más del 80% de los puntos relevados el error de medición se encontraba por debajo de 1 mm. En base a esos resultados, se calculó la curva de frecuencias acumuladas del valor absoluto del error relativo (ecuación 20), con lo que se logró describir el comportamiento del mismo en las mediciones de control o referencia (superficie plana horizontal)

$$e (\%) = \left| \left(\frac{Z_r - Z_k}{Z_r} \right) \right| \times 100 \quad [20]$$

Donde:

Z_r : es el valor de referencia

Z_k : valor medido

Lo mismo se realizó para los dos conjuntos de puntos definidos anteriormente, con la salvedad que aquí el valor de referencia es el medido cuando se ha drenado el canal.

En la Figura 98, se observan las tres gráficas de frecuencias acumuladas. En la misma se puede observar que el comportamiento del error relativo es muy similar en el caso de las mediciones sobre la superficie de referencia y en arena seca, y que existe una diferencia en aquellos puntos que se midieron bajo el agua y posteriormente fueron corregidos.

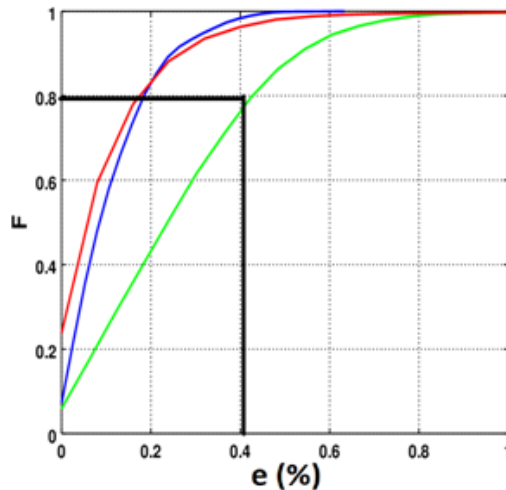


Figura 98.- curva de frecuencias acumuladas del error relativo para una superficie plana horizontal en azul, para las mediciones realizadas sobre arena seca en rojo y en verde la correspondiente a los puntos que fueron corregidos.

Asimismo se aprecia que en todos los casos el 80 % de los puntos se encuentran por debajo de un 0.4 % de error relativo. Cabe destacar que el 0.4 % de error relativo se corresponde en las mediciones corregidas a un error absoluto de 1.5 mm aproximadamente. En la Figura 99 se observa una gráfica de dispersión en donde se representan los valores de Z_k medidos vs los valores de Z_w corregidos. Superpuesta a la nube de puntos se encuentra representada la recta identidad, lo que permite de forma cualitativa estimar la calidad de los resultados obtenidos. Asimismo se calculó la una recta de tendencia forzada a pasar por cero, y en la misma se obtuvo una pendiente de 1.0 (redondeada al tercer decimal) con un R^2 de 0.97 redondeado a la segunda cifra decimal.

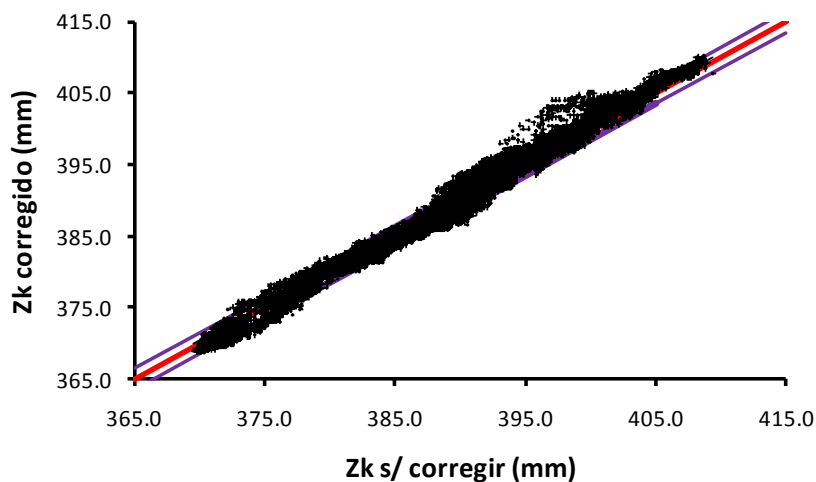


Figura 99.- Valores de profundidad medidos sin agua Vs los valores corregidos. En rojo se superpone la recta identidad a la nube de puntos y en color púrpura los correspondientes a la identidad ± 1 mm.

CAPÍTULO 7

Conclusiones

En el presente trabajo, se ha logrado la puesta a punto y en marcha en forma satisfactoria del canal experimental en el Laboratorio de Hidráulica de la Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Córdoba, el cual posee dos cualidades que lo hacen realmente atractivo; la primera el hecho de que sea a fondo móvil, y la segunda la posibilidad de variar la pendiente. Se han reproducido experimentos realizados por otros autores donde se obtuvieron resultados comparables a los expuestos en la literatura consultada, validando de esta manera el equipo experimental y la metodología de trabajo propuesta. Así mismo, se recomienda profundizar los estudios sobre el sistema de medición de caudales sólidos, ya que no todos los valores obtenidos se ajustan a lo expuesto por otros autores.

Se realizó un profundo estudio sobre los sensores de movimiento y la utilización de los mismos como posible alternativa para la medición de micro topografías en canales de laboratorio. Se desarrolló un procedimiento a partir del cual fue posible relevar la extensión completa del canal experimental disponible en el Laboratorio a través de un proceso de concatenación. Esta técnica permite obtener un gran volumen de información con calidad comparable a los métodos tradicionales de medición a un bajo costo, permitiendo generar modelos digitales de elevación (MDE) de muy alta densidad.

La obtención de un MDE con más de 4.200.000 celdas (en donde el 80% de ellas tiene una incertidumbre menor a 1 mm) en 3,5 hs. aproximadamente, es una tarea imposible de lograr con las técnicas tradicionales existentes, y aquellos instrumentos capaces de realizar este tipo de monitoreo 3D poseen un costo que supera ampliamente (órdenes de magnitud) al del sensor utilizado.

Es importante destacar que si bien la información altimétrica se arregla en matrices regulares (640 x 480 píxeles), cada pixel tiene coordenadas planimétricas bien definidas y que no se corresponden con una malla regular. Esto es equivalente a decir que el tamaño de los pixeles no es constante, y para la manipulación algebraica de estas matrices es de gran importancia tener en cuenta este aspecto.

Los modelos digitales de elevación obtenidos podrían ser la geometría de entrada en diversos modelos hidrodinámicos bidimensionales y tridimensionales, lo cual impactaría de manera directa en la calidad de los resultados, debido al detalle de los modelos de elevación obtenidos, que a partir de las técnicas tradicionales tendrían un alto costo en términos de tiempo empleado para los relevamientos.

El detalle que se logra con esta técnica también permite realizar otros tipos de estudio tales como la medición de volúmenes erosionados, caracterización y movimiento de formas de fondo, detección de zonas de escurrimiento principal, migración de meandros, etc.

En el desarrollo y optimización de la técnica, se encontró que hay parámetros a determinar para lograr que las mediciones sean de calidad. Estos parámetros son la distancia de captura, el tiempo de precalentamiento (o *warm – up time*), la definición de una sub matriz donde los resultados son más uniformes, la posición de esta sub matriz respecto de la original y el número de fotogramas a promediar del mismo mensurando. Para el equipo estudiado los parámetros obtenidos fueron 60 cm de distancia de captura, 60 minutos de tiempo de precalentamiento, 240 x 320 pixeles el tamaño de la ventana (o submatriz) la cual debe estar centrada y finalmente promediando 10 imágenes los resultados son satisfactorios.

Se considera que la técnica de medición propuesta resultará de interés para aquellos que trabajan en experimentación en la Hidráulica Fluvial, y a su vez el procedimiento empleado es aplicable al desarrollo de diversas técnicas de medición y que en este trabajo en particular se ha aplicado al uso de un sensor de movimiento para realizar relevamientos topográficos a escala de laboratorio.

En base a los satisfactorios resultados obtenidos en la aplicación de los sensores de movimiento al relevamiento de topografía a escala de laboratorio, sobre superficies secas, se decidió investigar la posibilidad que poseen estos equipos de medir a través del agua. Se realizaron diversos estudios controlados donde se logró medir, en principio, con agua filtrada hasta una profundidad de 30 cm (no se ensayaron profundidades mayores), donde se detectó que estas mediciones sufrían una distorsión, la cual varía linealmente en función de la profundidad del flujo. En vista de que los ensayos que se realizan en el equipo experimental no son con agua filtrada, se evaluó la capacidad de medir del sensor a través de agua con diferentes niveles de

turbidez. Se desarrolló una técnica que permitió hacer este análisis, donde finalmente se concluye que la capacidad de medición en agua turbia no sólo depende del nivel de turbidez, si no también de la profundidad del flujo. Con numerosos ensayos realizados para diversas profundidades y niveles de turbidez, se determinó el dominio de aplicación de estos sensores.

En base a los resultados satisfactorios obtenidos, se desarrolló una novedosa técnica que permite realizar mediciones a tiempo real de la evolución temporal de un cauce aluvial en canales de laboratorio cuando se desarrollan procesos de erosión.

Este procedimiento permite obtener modelos digitales de elevación con una alta resolución temporal (capturas cada 1 segundo aproximadamente) durante el tiempo que el laboratorista defina. Cada MDE obtenido contiene más de 76000 puntos, lo que permite realizar estudios detallados de diferentes parámetros de interés en la hidráulica fluvial.

La gran ventaja de esta técnica, es el hecho de no ser intrusiva, característica que, según el estado actual del conocimiento, no se ha logrado hasta el momento, o no al menos con los costos aquí planteados (U\$S 150 aproximadamente).

La aplicación del procedimiento planteado en canales de laboratorio, permite realizar estudios evolutivos de diferentes parámetros, tales como la pendiente general del cauce, el ancho superficial, la variación de profundidad de un sector, determinar volúmenes de sedimento erosionado o depositado, migración de márgenes, etc.

Por último, se concluye que la calidad de los resultados obtenidos es muy satisfactoria, siendo el comportamiento del error relativo de las mediciones bajo el agua del mismo orden de magnitud que para la superficie de referencia propuesta y compatible con la calidad requerida en estudios de hidráulica fluvial en laboratorio. Se espera que el avance presentado sobre las técnicas de relevamiento topográfico y la utilización de sensores de bajo costo para esta tarea, sea de utilidad en diversas aplicaciones de laboratorio, y que el presente documento sea de utilidad a otros investigadores para continuar con nuevos desarrollos y aplicaciones a las Ciencias de La Tierra.

CAPÍTULO 8

Referencias Bibliográficas

Referencias

Ackers, P., & Charlton, F. G. (1970). "Meandering of small streams in alluvium". Report N° 77, Hydraulics Research Station, Wallingford, Berkshire, England,

Anderson AG, Parker G, Wood A, (1975). "The flow and the stability characteristics of alluvial river channels". Report N° 157, St Anthony Falls Laboratory, University of Minnesota, USA.

Andrew, D.W. (2010). "Using a depth camera as a touch sensor". Proceedings of the ACM International Conference on Interactive Tabletops and Surfaces, Saarbrucken, Germany, 7–10.

ASTM D 854-06 . (2006). Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer. Estados Unidos.

Asus Xtion pro: <http://www.asus.com> (última visita 01/06/2013)

Barton, J. T., and Lin, Pin-Nam, (1955). "A study of sediment transport in alluvial channels". Colorado State Univ., Dept. Civil Engineering Reserch Rept. 55JRB2, 43 p.

Braudrick, C. A., Dietrich, W. E., Leverich, G. T., & Sklar, L. S. (2009). "Experimental evidence for the conditions necessary to sustain meandering in coarse-bedded rivers". Proceedings of the National Academy of Sciences,106(40), 16936-16941.

Breuer, P., Eckes, C., Muller, S., (2007). "Hand gesture recognition with a novel IR time-of-flight range camera - a pilot study, in: Gagalowicz, A., Philips, W. (Eds.)", Lecture Notes in Computer Science. Springer, Berlin, pp. 247-260.

Brooks, N. H. (1958). "Mechanics of streams with movable beds of fine sand." [Includes experiments by V. A. Vanoni and N.H. Brooks, and by G. Nomicos]: Am. Soc. Civil Engineers, 123, 526-594. N° HY 2.

Brownlie, W. R. (1981). "Compilation of alluvial channel data: laboratory and field". Report N° KH-R-43B. W. M. Keck Laboratory of Hydraulics and Water Resources, Division of Engineering and Applied Science, California Institute of Technology, Pasadena, California.

Chang, Y. J., Chen, S. F., & Huang, J. D. (2011). "A Kinect-based system for physical rehabilitation: A pilot study for young adults with motor disabilities". Research in developmental disabilities, 32(6), 2566-2570.

Chow, V.T. (1994), Hidráulica de Canales abiertos, Mc Graw-Hill, Colombia.

Chow, J., Ang, K., Lichti, D., & Teskey, W. (2012). "Performance analysis of a low-cost triangulation-based 3D camera: Microsoft Kinect system". Proceedings of the International Achieves of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Melbourne, Australia, 25, 239-244.

Dalla Mura, M., Aravecchia, M., & Zanin, M. (2012). "Outdoor 3D with Kinect: preliminary results in the granulometry of fluvial sediments". Technologies of Vision, Fondazione Bruno Kessler, Trento, Italy. 8 a 9 de Marzo 2012.

Diplas, P. (1990). "Characteristics of self-formed straight channels". Journal of Hydraulic Engineering, 116(5), 707-728.

Dulal, K. P., & Shimizu, Y. (2009). "Experimental simulation of river planforms in cohesion mixed flood plain". Annual Journal of Hydraulic Engineering, jsce, 53, 133-138.

Farias, H. D. (1994). "Empleo de Micro-Canales de Laboratorio para Estimar la Geometría Hidráulica de Canales Aluviales en Régimen", Congreso Latinoamericano de Hidráulica, IARH, Vol. 2, pp. 133-144.

Farias, H. D. y Pilán, M. T. (2000). "Análisis de Fórmulas de Fricción Aplicables a Canales Arenosos en Régimen". XIX Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Córdoba, Argentina. Tomo I, pp. 511-520.

Friedkin JF. (1945). "A laboratory study of de meandering of alluvial river". In Benchmark Papers in Geology – River Morphology. Schumm S (ed). Dowden, Hutchinson and Ross: Stroudsburg, USA, 1972; 237-281.

Freedman, B.; Shpunt, A.; Machline, M.; Arieli, Y. (2010). "Depth Mapping Using Projected Patterns". U.S. Patent 2010/0118123.

Galna, B., Barry, G., Jackson, D., Mhiripiri, D., Olivier, P., & Rochester, L. (2014). "Accuracy of the Microsoft Kinect sensor for measuring movement in people with Parkinson's disease". Gait & posture, 39(4), 1062-1068.

Gilbert, G. K., (1914). "The transport of debris by running water." U.S. Geol. Survey Prof. Paper 86, 263 p.

Glover, R. E. and Florey, Q. L. (1951). "Stable Channel Profiles." U. S. Bureay of Reclamation, Washington, D. C.

Guy, H. P., Simons, D. B., & Richardson, E. V. (1966). "Summary of alluvial channel data from flume experiments". 1956-61. Sediment Transport in Alluvial Channels. Geological Survey Professional Paper No. 462-I.

Hammerle, M., Hofle, B., Fuchs, J., Schroder-Ritzrau, A., Vollweiler, N., & Frank, N. (2014). "Comparison of kinect and terrestrial LiDAR capturing natural karst Cave 3-D objects". *Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE*, 11(11), 1896-1900.

Henry, P., Krainin, M., Herbst, E., Ren, X., & Fox, D. (2014). "RGB-D mapping: Using depth cameras for dense 3D modeling of indoor environments". In *Experimental robotics* (pp. 477-491). Springer Berlin Heidelberg.

Herbst, E., Henry, P., Ren, X., & Fox, D. (2011). "Toward object discovery and modeling via 3-d scene comparison". In *Robotics and Automation (ICRA), 2011 IEEE International Conference on* (2623-2629). IEEE.

Herrera, D., Kannala, J., & Heikkilä, J. (2011). "Accurate and practical calibration of a depth and color camera pair". In *Computer analysis of images and patterns* (pp. 437-445). Springer Berlin Heidelberg.

Hokuyo UXM-30LN Scanning Laser Rangefinder Datasheet, Hokuyo, (2009). [Online]. Available: http://www.hokuyo-aut.jp/02sensor/07scanner/uxm_30ln_p.html [última visita: 12 Feb 2012]

Ikeda, S. y Izumi, N. (1996). "Stable Channel Cross Sections of Straight Sand Rivers", *Water Resources Research*, 27 (9), 2429-2438.

IRAM 1505. 2005. Agregados. Análisis granulométricos. 12 pp. Buenos Aires.

Johnson, J. W., (1943). "Laboratory investigations on bead load transportation and bed roughness." U.S. Solid Conservation Service Report. SCS-TP-50, 116p.

Kahlmann, T., Ingensand, H., (2008). "Calibration and development for increased accuracy of 3D range imaging cameras". *Journal of Applied Geodesy* 2, 1-11.

Kennedy, J. F., (1961). "Stationary waves and antidunes in alluvial channels". Pasadena, California Inst. Technology Rept. KH-R2, 146 p.

Kennedy, J. F., y Brooks, N. H., (1965), "Laboratory study of de alluvial stream at constant discharge". *Proceedings of the Federal Inter-Agency Sedimentation Conference, 1963*. U.S Dept. Agriculture Misc. Pub. 970, 320 – 330.

Khoshelham, K. (2011). "Accuracy analysis of kinect depth data". In ISPRS workshop laser scanning, 38 (5), W12.

Khoshelham, K., & Elberink, S. O. (2012). "Accuracy and resolution of kinect depth data for indoor mapping applications". Sensors, 12(2), 1437-1454.

Laursen, E. M., (1958). "The total sediment load of streams". Am. Soc. Civil Engineers Proc., Journal Hydraulics Div., 84 (HY1), 1-36.

Lichti, D.D., (2008). "Self-calibration of a 3D range camera, International Archives of the Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences", Vol. XXXVII, Part B5, Beijing, China, pp. 927-932

Mankoff, K. D., & Russo, T. A. (2012). "The Kinect: a low-cost, high-resolution, short-range 3D camera." Earth Surface Processes and Landforms, 38(9), 926-936.

Menna, F., Remondino, F., Battisti, R., & Nocerino, E. (2011). "Geometric investigation of a gaming active device". In SPIE Optical Metrology (pp. 80850G-80850G). International Society for Optics and Photonics.

Microsoft Kinect: <http://www.xbox.com/en-us/kinect> (última visita 05/09/2013)

Novak, P., Guinot, V., Jeffrey, A., & Reeve, D. E. (2010). "Hydraulic Modelling—An Introduction: Principles, Methods and Applications". CRC Press.

Parker, G., Shimizu, Y., Wilkerson, G. V., Eke, E. C., Abad, J. D., Lauer, J. W., & Voller, V. R. (2011). "A new framework for modeling the migration of meandering rivers". Earth Surface Processes and Landforms, 36(1), 70-86.

Pilan, M. T. (1998). "Geometría Hidráulica de Canales Aluviales en Régimen". Investigación Experimental mediante el uso de Microcanales de laboratorio. Tesis M.Sc., CIDIAT-ULA, Mérida, Venezuela.

Pilán, M. T., Azar, F. J. P., & Farias, H. D. (2003). "Estudio Experimental de la evolución y estabilidad de cauces fluviales con lecho de arena". Memorias del Primer Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos, RIOS 2003. Ezeiza, Buenos Aires, Argentina, Noviembre de 2003. [ISBN N° 987-20109-2-7, Libro + CD-ROM].

PrimeSense Ltd (2011). <http://www.primesense.com> (última visita 05/09/2014)

Puebla, J. G., & Gould, M. (1994). SIG: Sistemas de información geográfica. Síntesis.

Rathbun, R. E., Guy, H. P., & Richardson, E. V. (1969). "Response of a laboratory alluvial channel to changes of hydraulic and sediment-transport variables". A comparison of the feed and recirculation system of flume operation for laboratory studies of sediment transport and resistance to flow. Geological Survey Professional Paper N°. 562-D.

Raudviki, A. J., (1967). "Analysis of resistance in fluvial channels". American Society of Civil Engineers, Journal of the Hydraulics Division, 93 (HY5), 73 – 84.

Rincón, M., Márquez, Á., de Vries, B. V. W., Espada, R. H., Bruña, J. L. G., & Estrada, P. L. (2015). "Aplicación del sensor Kinect en modelos análogos para la identificación morfo-estructural de procesos de deformación en volcanes". Geogaceta, (57), 107-110.

R400 Datasheet Rev. 5.1, Mesa Imaging, 2011. [Online]. Disponible: http://www.mesa-imaging.ch/dlm.php?fname=pdf/SR4000_Data_Sheet.pdf [ultima visita: 11 Feb 2012]

Schumm SA, Khan HR, (1972). "Experimental study of channel patterns". Bulletin of de Geological Society of America 83: 1755 – 1770.

Schwarte, R., Häusler, G., & Malz, R. W. (2000). Three-dimensional imaging techniques. Computer Vision and Applications: A Guide for Students and Practitioners, 177-208.

Smisek, J., Jancosek, M., & Pajdla, T. (2013). "3D with Kinect. In Consumer Depth Cameras for Computer Vision", (pp. 3-25). Springer London.

Smith, C. E. (1998). "Modeling high sinuosity meanders in a small flume." Geomorphology, 25(1), 19-30.

Soules L., Wiens K. (2010). "Microsoft Kinect teardown". iFixit.com. [Online]. Disponible: <http://www.ifixit.com/Teardown/Microsoft-Kinect-Teardown/4066> [última visita: 27/04/2016]

Stowers, J., Hayes, M., & Bainbridge-Smith, A. (2011). "Altitude control of a quadrotor helicopter using depth map from Microsoft Kinect sensor". In Mechatronics (ICM), IEEE International Conference on (pp. 358-362). IEEE.

Szeliski, R. (2010). Computer vision: algorithms and applications. Springer Science & Business Media.

Tiffani JB, Nelson GA, (1939). "Studies of meandering of model streams". Transaction of the American Geophysical Union, part IV, 644 – 649.

Universidad Tecnológica Nacional (2010). Resolución Rectorado 2417/2010.

Vanoni, V. A., and Hwang, L. S., (1967), "Relation between bed forms and friction in streams". Am. Soc. Civil Engineers Proc., Journal Hydraulics Div. 93 (HY3), 121 – 144.

Vergara Sanchez, M. (1995). "Técnicas de modelación en Hidráulica". Ed. Alfaomega Grupo. México, D.F. ISBN 970-15-0114-4.

Vigilar Jr, G. G. (1997). "Determination of optimal stable channel profiles". Tesis Doctoral. Dissertation submitted to the Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University. [Online] Disponible: <http://hdl.handle.net/10919/30528> (última visita: 20/07/2016).

Weber J. F., Bupo M. (2013). "Canal a Fondo Móvil de pendiente variable en el Laboratorio de Hidráulica, UTN-FRC". III Simposio sobre Métodos Experimentales en Hidráulica, MEHIII. FICH-UNL, Santa Fe, 20 al 22 de marzo de 2013.

Wells, R. R., Momm, H. G., Rigby, J. R., Bennett, S. J., Bingner, R. L., & Dabney, S. M. (2013). "An empirical investigation of gully widening rates in upland concentrated flows." *Catena*, 101, 114-121.

Xtion pro: <http://www.asus.com> (última visita 01/06/2013)

Yalin, M. S., & Da Silva, A. M. F. (2001). "Fluvial Processes: Solutions Manual". IAHR Monograph. Delft.

Yamazoe, H., Habe, H., Mitsugami, I., & Yagi, Y. (2012). "Easy depth sensor calibration". In *Pattern Recognition (ICPR), 2012 21st International Conference on* (pp. 465-468). IEEE.

ANEXO I

Mediciones realizadas para la determinación del ángulo de fricción interna del material aluvial componente del canal experimental

Tabla 11: Mediciones correspondientes al ensayo N° 1

ENSAYO N° 1: Sin confinamiento lateral		
H (mm)=		24.8
L1 (mm)	L2 (mm)	Ángulo
317	360	29.989
229	271	30.576
233	276	29.989
231	273	30.576
291	328	33.850
215	259	29.422
281	318	33.850
218	254	34.580
203	243	31.815
204	250	28.345
274	309	35.338
269	307	33.147
201	240	32.469
195	230	35.338
261	298	33.850
197	238	31.185
189	228	32.469
258	296	33.147
190	234	29.422
186	224	33.147
259	295	34.580
191	234	29.989
182	221	32.469
255	292	33.850
191	233	30.576
178	217	32.469
249	289	31.815
183	227	29.422
173	211	33.147
167	204	33.850
178	221	29.989
248	286	33.147
246	284	33.147
176	213	33.850
PROMEDIO		32.200
DESVÍO		1.906

Tabla 12: Mediciones correspondientes al ensayo N° 2

ENSAYO N° 2: Con confinamiento lateral			
X (cm)	L1 (cm)	L2 (cm)	Ángulo
3	12.9	14.8	32.364
3	11.4	13.2	30.979
5	12.6	15.8	32.636
5	11.5	14.9	34.233
5	13.2	16.4	32.636
5	12.8	16.3	35.010
8	12.8	17.9	32.534
8	12.3	17.5	33.041
8	14.3	19.5	33.041
8	19	24	32.022
8	17.5	22.5	32.022
8	18.2	23.3	32.534
5	17.7	20.8	31.815
8	17.4	22.5	32.534
Promedio			32.671
Desvío			0.991

Tabla 13: Mediciones correspondientes al ensayo sumergido

ENSAYO N° 3: Con confinamiento lateral sumergido			
Delta x (cm)	L1 (cm)	L2 (cm)	Ángulo
5	21.7	24.5	29.264
8	21.5	26	29.373
5	21.4	24.4	30.979
8	21	25.5	29.373
5	21.2	24.2	30.979
8	20.6	25.1	29.373
8	20.8	26	33.041
8	20.3	25	30.450
8	20.6	25.6	32.022
8	20	25	32.022
8	20.3	25.1	30.979
8	19.6	24.2	29.914
8	20.4	25	29.914
8	19.6	24.2	29.914
8	20	24.8	30.979
8	19.3	23.9	29.914
8	19.6	24.3	30.450
8	18.6	23.5	31.503
8	19	23.8	30.979
8	18.4	23	29.914
8	18.7	23.3	29.914
5	19.5	22.5	30.979
8	18.4	23.1	30.450
5	19.3	22.4	31.815
8	18	22.6	29.914
5	18.9	21.7	29.264
Promedio			30.526
Desvío			0.989

Mediciones realizadas con distanciómetro

Tabla 14: tabla de datos y parámetros estadísticos para la superficie de arena fina húmeda horizontal

ARENA FINA HUMEDA HORIZONTAL												
Coord. Horizontal	426	454	483	518	544	568	603	632	668	694	719	750
Distancia Vertical (mm)	1144	1144	1145	1145	1144	1145	1144	1145	1144	1144	1144	1144
	1144	1144	1144	1145	1144	1145	1145	1144	1144	1144	1143	1144
	1144	1144	1144	1145	1144	1145	1145	1145	1144	1144	1144	1144
	1144	1144	1144	1145	1144	1145	1144	1145	1145	1144	1144	1144
	1143	1144	1145	1145	1144	1145	1145	1145	1144	1145	1144	1144
	1144	1144	1144	1145	1144	1145	1144	1145	1145	1144	1144	1143
	1145	1144	1145	1144	1144	1145	1144	1145	1144	1144	1144	1144
	1144	1144	1144	1145	1144	1144	1144	1145	1144	1144	1144	1144
Minimo (mm)	1143	1144	1144	1144	1144	1144	1144	1144	1144	1143	1143	1143
Máximo (mm)	1145	1144	1145	1145	1144	1145	1145	1145	1145	1145	1144	1145
Media (mm)	1144	1144	1144.4	1144.9	1144	1144.9	1144.4	1144.9	1144.2	1144	1143.9	1144
Desvio standar (mm)	0.47	0	0.52	0.32	0	0.32	0.52	0.32	0.42	0.47	0.32	0.47
error cuadrático (mm)	0.15	0.00	0.16	0.10	0.00	0.10	0.16	0.10	0.13	0.15	0.10	0.15

Tabla 15: tabla de datos y parámetros estadísticos para la superficie de arena fina húmeda a 5 °

ARENA FINA HUMEDA A 5 °												
Coord. Horizontal	424	455	483	515	546	574	606	636	664	694	724	754
Distancia Vertical (mm)	1125	1128	1130	1132	1134	1134	1136	1139	1141	1142	1142	1145
	1126	1126	1129	1132	1133	1135	1137	1138	1141	1141	1143	1145
	1125	1127	1129	1132	1133	1135	1138	1139	1141	1142	1143	1144
	1125	1127	1129	1132	1132	1136	1137	1139	1141	1142	1143	1145
	1125	1126	1129	1133	1133	1135	1137	1138	1140	1142	1142	1145
	1126	1127	1130	1133	1132	1136	1137	1139	1140	1141	1142	1145
	1125	1127	1130	1132	1133	1135	1138	1139	1140	1142	1142	1144
	1125	1126	1130	1133	1132	1135	1137	1138	1140	1142	1143	1145
	1125	1126	1130	1133	1133	1135	1137	1138	1141	1141	1143	1145
	1126	1126	1129	1132	1133	1134	1137	1138	1140	1142	1144	1146
Minimo (mm)	1125	1126	1129	1132	1132	1134	1136	1138	1140	1141	1142	1144
Máximo (mm)	1126	1128	1130	1133	1134	1136	1138	1139	1141	1142	1144	1146
Media (mm)	1125.3	1126.6	1129.5	1132.4	1132.8	1135	1137.1	1138.5	1140.5	1141.7	1142.7	1144.9
Desvio standar (mm)	0.48	0.7	0.53	0.52	0.63	0.67	0.57	0.53	0.53	0.48	0.67	0.57
error cuadrático (mm)	0.15	0.22	0.17	0.16	0.20	0.21	0.18	0.17	0.17	0.15	0.21	0.18

Tabla 16: tabla de datos y parámetros estadísticos para la superficie de arena fina húmeda a 10 °

ARENA FINA HUMEDA A 10 °												
Coord. Horizontal	424	454	484	514	547	573	606	636	665	697	726	755
Distancia Vertical (mm)	1086	1092	1098	1103	1108	1111	1117	1120	1126	1126	1135	1139
	1086	1092	1098	1102	1108	1111	1117	1120	1125	1127	1135	1139
	1087	1092	1098	1103	1107	1111	1118	1120	1125	1127	1135	1139
	1086	1092	1098	1103	1108	1111	1117	1119	1125	1127	1135	1139
	1087	1092	1098	1103	1107	1112	1117	1119	1125	1128	1135	1139
	1087	1092	1098	1103	1107	1111	1117	1120	1125	1126	1135	1139
	1086	1091	1098	1103	1108	1110	1117	1119	1126	1127	1135	1139
	1086	1092	1098	1103	1108	1111	1118	1120	1125	1127	1136	1139
	1086	1092	1098	1102	1108	1112	1117	1119	1125	1126	1135	1139
1087	1092	1098	1103	1108	1111	1117	1119	1126	1126	1135	1139	
Mínimo (mm)	1086	1091	1098	1102	1107	1110	1117	1119	1125	1126	1135	1139
Máximo (mm)	1087	1092	1098	1103	1108	1112	1118	1120	1126	1128	1136	1139
Media (mm)	1086.4	1091.9	1098	1102.8	1107.7	1111.1	1117.2	1119.5	1125.3	1126.7	1135.1	1139
Desvio standar (mm)	0.52	0.32	0	0.42	0.48	0.57	0.42	0.53	0.48	0.67	0.32	0
error cuadrático (mm)	0.16	0.10	0.00	0.13	0.15	0.18	0.13	0.17	0.15	0.21	0.10	0.00

Tabla 17: tabla de datos y parámetros estadísticos para la superficie de arena fina húmeda a 15 °

ARENA FINA HUMEDA A 15 °												
Coord. Horizontal	426	458	487	518	547	573	606	636	663	695	724	756
Distancia Vertical (mm)	1039	1049	1057	1060	1067	1071	1080	1093	1093	1101	1106	1113
	1039	1048	1057	1059	1066	1071	1079	1093	1093	1101	1106	1113
	1040	1047	1057	1059	1067	1071	1080	1092	1092	1101	1105	1114
	1039	1048	1057	1059	1066	1071	1080	1093	1092	1101	1106	1113
	1039	1049	1057	1061	1066	1071	1080	1093	1093	1101	1105	1113
	1039	1048	1057	1060	1066	1071	1080	1092	1092	1101	1106	1113
	1039	1049	1053	1059	1066	1071	1081	1093	1092	1101	1106	1113
	1039	1049	1052	1060	1067	1070	1079	1092	1093	1101	1106	1113
	1039	1048	1053	1059	1066	1070	1080	1093	1092	1101	1106	1113
	1039	1048	1052	1059	1066	1071	1080	1092	1093	1102	1106	1113
Mínimo (mm)	1039	1047	1052	1059	1066	1070	1079	1092	1092	1101	1105	1113
Máximo (mm)	1040	1049	1057	1061	1067	1071	1081	1093	1093	1102	1106	1114
Media (mm)	1039.1	1048.3	1055.2	1059.5	1066.3	1070.8	1079.9	1092.6	1092.5	1101.1	1105.8	1113.1
Desvio standar (mm)	0.32	0.67	2.35	0.71	0.48	0.42	0.57	0.52	0.53	0.32	0.42	0.32
error cuadrático (mm)	0.10	0.21	0.74	0.22	0.15	0.13	0.18	0.16	0.17	0.10	0.13	0.10

Tabla 18: tabla de datos y parámetros estadísticos para la superficie de arena fina húmeda a 20 °

ARENA FINA HUMEDA A 20 °												
Coord. Horizontal	424	453	484	516	546	573	607	636	668	696	725	754
Distancia Vertical (mm)	993	1004	1013	1024	1034	1042	1054	1063	1078	1087	1100	1111
	994	1003	1013	1024	1033	1042	1053	1063	1078	1087	1100	1110
	994	1003	1014	1024	1034	1042	1054	1062	1079	1088	1099	1112
	993	1004	1014	1023	1034	1042	1053	1064	1077	1089	1099	1111
	994	1003	1014	1024	1034	1042	1053	1063	1078	1087	1100	1110
	993	1002	1013	1025	1034	1042	1054	1063	1079	1088	1100	1111
	993	1003	1013	1024	1034	1042	1053	1063	1078	1088	1100	1111
	993	1004	1013	1024	1034	1042	1053	1063	1079	1088	1100	1111
	994	1003	1014	1024	1034	1042	1053	1064	1079	1088	1100	1111
993	1004	1013	1024	1034	1042	1054	1064	1078	1087	1099	1111	
Mínimo (mm)	993	1002	1013	1023	1033	1042	1053	1062	1077	1087	1099	1110
Máximo (mm)	994	1004	1014	1025	1034	1042	1054	1064	1079	1089	1100	1112
Media (mm)	993.4	1003.3	1013.4	1024	1033.9	1042	1053.4	1063.2	1078.3	1087.7	1099.7	1110.9
Desvio standar (mm)	0.52	0.67	0.52	0.47	0.32	0	0.52	0.63	0.67	0.67	0.48	0.57
error cuadrático (mm)	0.16	0.21	0.16	0.15	0.10	0.00	0.16	0.20	0.21	0.21	0.15	0.18

Tabla 19: tabla de datos y parámetros estadísticos para la superficie de arena fina húmeda a 25 °

ARENA FINA HUMEDA A 25 °												
Coord. Horizontal	428	457	486	518	547	575	606	637	664	695	725	754
Distancia Vertical (mm)	953	965	975	992	1004	1015	1036	1048	1055	1073	1084	1100
	953	964	976	991	1005	1014	1037	1048	1054	1073	1084	1100
	953	966	975	991	1005	1016	1036	1047	1054	1073	1085	1098
	952	966	974	991	1005	1015	1036	1048	1055	1074	1084	1098
	953	965	975	991	1003	1014	1036	1047	1055	1073	1084	1098
	952	965	975	991	1004	1014	1035	1047	1055	1072	1084	1098
	953	965	975	990	1004	1014	1036	1048	1055	1074	1084	1098
	953	966	974	992	1005	1014	1036	1049	1054	1074	1084	1097
	952	966	974	992	1004	1015	1036	1048	1054	1073	1084	1098
952	965	974	992	1004	1013	1035	1047	1054	1073	1085	1098	
Mínimo (mm)	952	964	974	990	1003	1013	1035	1047	1054	1072	1084	1097
Máximo (mm)	953	966	976	992	1005	1016	1037	1049	1055	1074	1085	1100
Media (mm)	952.6	965.3	974.7	991.3	1004.3	1014.4	1035.9	1047.7	1054.5	1073.2	1084.2	1098.3
Desvio standar (mm)	0.52	0.67	0.67	0.67	0.67	0.84	0.57	0.67	0.53	0.63	0.42	0.95
error cuadrático (mm)	0.16	0.21	0.21	0.21	0.21	0.27	0.18	0.21	0.17	0.20	0.13	0.30

Tabla 20: tabla de datos y parámetros estadísticos para la superficie de arena fina húmeda a 30 °

ARENA FINA HUMEDA A 30 °												
Coord. Horizontal	427	459	488	520	549	573	608	640	669	695	725	755
Distancia Vertical (mm)	903	925	933	952	970	977	1001	1019	1030	1044	1059	1078
	903	926	933	953	969	977	1001	1019	1030	1043	1058	1078
	904	926	934	953	970	977	1001	1020	1030	1043	1059	1078
	903	926	933	953	970	977	1000	1020	1030	1043	1059	1078
	904	926	933	953	970	977	1001	1019	1030	1043	1059	1078
	903	926	933	952	970	977	1001	1019	1030	1043	1059	1078
	903	926	933	953	970	976	1004	1020	1030	1044	1059	1078
	903	926	933	953	969	977	1001	1019	1030	1044	1059	1078
	903	926	933	953	969	977	1000	1020	1030	1043	1059	1078
903	926	933	953	970	976	1001	1019	1030	1043	1059	1078	
Mínimo (mm)	903	925	933	952	969	976	1000	1019	1030	1043	1058	1078
Máximo (mm)	904	926	934	953	970	977	1004	1020	1030	1044	1059	1078
Media (mm)	903.2	925.9	933.1	952.8	969.7	976.8	1001.1	1019.4	1030	1043.3	1058.9	1078
Desvio standar (mm)	0.42	0.32	0.32	0.42	0.48	0.42	1.1	0.52	0	0.48	0.32	0
error cuadrático (mm)	0.13	0.10	0.10	0.13	0.15	0.13	0.35	0.16	0.00	0.15	0.10	0.00

Tabla 21: tabla de datos y parámetros estadísticos para la superficie de arena fina húmeda a 35 °

ARENA FINA HUMEDA A 35 °												
Coord. Horizontal	427	456	487	517	546	576	607	635	665	695	730	756
Distancia Vertical (mm)	854	873	893	911	928	952	967	995	1013	1038	1052	1081
	855	872	893	911	928	951	967	995	1013	1039	1051	1081
	854	873	893	910	928	952	967	995	1012	1038	1050	1080
	855	873	893	911	928	951	967	995	1013	1038	1051	1081
	855	872	893	911	927	951	967	995	1012	1038	1051	1081
	855	872	893	911	927	950	968	994	1012	1037	1050	1081
	855	871	892	911	928	951	967	995	1013	1038	1051	1081
	855	872	893	911	928	952	967	994	1013	1038	1050	1080
	856	873	893	911	928	951	967	994	1013	1038	1052	1081
855	873	893	910	927	951	967	993	1013	1038	1050	1081	
Mínimo (mm)	854	871	892	910	927	950	967	993	1012	1037	1050	1080
Máximo (mm)	856	873	893	911	928	952	968	995	1013	1039	1052	1081
Media (mm)	854.9	872.4	892.9	910.8	927.7	951.2	967.1	994.5	1012.7	1038	1050.8	1080.8
Desvio standar (mm)	0.57	0.7	0.32	0.42	0.48	0.63	0.32	0.71	0.48	0.47	0.79	0.42
error cuadrático (mm)	0.18	0.22	0.10	0.13	0.15	0.20	0.10	0.22	0.15	0.15	0.25	0.13

Tabla 22: tabla de datos y parámetros estadísticos para la superficie de arena fina húmeda a 40 °

ARENA FINA HUMEDA A 40 °												
Coord. Horizontal	428	454	488	518	549	549	609	638	665	697	726	755
Distancia Vertical (mm)	783	796	830	856	881	903	931	956	972	1002	1029	1054
	783	796	830	857	881	902	931	956	972	1001	1029	1054
	783	795	831	857	881	902	931	955	973	1001	1029	1055
	782	796	831	857	881	903	931	956	971	1001	1029	1054
	782	796	830	856	882	902	931	955	972	1001	1030	1053
	782	796	830	857	881	902	931	954	972	1001	1028	1056
	783	796	829	856	881	902	931	956	972	1001	1029	1054
	782	796	829	856	882	902	931	956	972	1003	1028	1055
	783	794	830	857	881	902	931	956	971	1002	1028	1054
782	795	830	856	880	902	931	956	972	1001	1029	1054	
Mínimo (mm)	782	794	829	856	880	902	931	954	971	1001	1028	1053
Máximo (mm)	783	796	831	857	882	903	931	956	973	1003	1030	1056
Media (mm)	782.5	795.6	830	856.5	881.1	902.2	931	955.6	971.9	1001.4	1028.8	1054.3
Desvio standar (mm)	0.53	0.7	0.67	0.53	0.57	0.42	0	0.7	0.57	0.7	0.63	0.82
error cuadrático (mm)	0.17	0.22	0.21	0.17	0.18	0.13	0.00	0.22	0.18	0.22	0.20	0.26

Tabla 23: tabla de datos y parámetros estadísticos para la superficie de arena fina húmeda a 45 °

ARENA FINA HUMEDA A 45 °												
Coord. Horizontal	428	454	489	521	549	574	605	639	666	695	728	754
Distancia Vertical (mm)	712	735	764	804	836	856	890	917	957	966	1021	1038
	712	735	764	804	836	856	888	916	957	967	1022	1038
	713	736	763	804	836	856	889	915	956	967	1020	1037
	712	735	763	804	835	856	888	915	956	966	1021	1038
	712	736	763	803	835	857	889	915	956	966	1021	1037
	711	735	763	802	835	856	888	915	955	967	1020	1038
	712	735	763	803	835	855	889	915	956	967	1021	1039
	712	735	762	803	836	855	888	915	956	966	1021	1035
	712	736	763	803	835	856	889	915	955	967	1021	1038
711	734	763	803	836	857	889	917	956	966	1021	1038	
Mínimo (mm)	711	734	762	802	835	855	888	915	955	966	1020	1035
Máximo (mm)	713	736	764	804	836	857	890	917	957	967	1022	1039
Media (mm)	711.9	735.2	763.1	803.3	835.5	856	888.7	915.5	956	966.5	1020.9	1037.6
Desvio standar (mm)	0.57	0.63	0.57	0.67	0.53	0.67	0.67	0.85	0.67	0.53	0.57	1.07
error cuadrático (mm)	0.18	0.20	0.18	0.21	0.17	0.21	0.21	0.27	0.21	0.17	0.18	0.34

Tabla 24: tabla de datos y parámetros estadísticos para la superficie de arena fina seca a horizontal

ARENA FINA SECA HORIZONTAL												
Coord. Horizontal	426	454	483	518	544	568	603	632	668	694	719	750
Distancia Vertical (mm)	1144	1144	1145	1145	1144	1145	1144	1145	1144	1144	1144	1144
	1144	1144	1144	1145	1144	1145	1145	1144	1144	1144	1143	1144
	1144	1144	1144	1145	1144	1145	1145	1145	1144	1144	1144	1144
	1144	1144	1144	1145	1144	1145	1144	1145	1145	1144	1144	1144
	1143	1144	1145	1145	1144	1145	1145	1145	1144	1145	1144	1144
	1144	1144	1144	1145	1144	1145	1144	1145	1145	1144	1144	1143
	1145	1144	1145	1144	1144	1145	1144	1145	1144	1144	1144	1144
	1144	1144	1144	1145	1144	1144	1144	1145	1144	1144	1144	1144
	1144	1144	1144	1145	1144	1145	1145	1145	1144	1143	1144	1145
1144	1144	1145	1145	1144	1145	1144	1145	1144	1144	1144	1144	
Minimo (mm)	1143	1144	1144	1144	1144	1144	1144	1144	1144	1143	1143	1143
Máximo (mm)	1145	1144	1145	1145	1144	1145	1145	1145	1145	1145	1144	1145
Media (mm)	1144	1144	1144.4	1144.9	1144	1144.9	1144.4	1144.9	1144.2	1144	1143.9	1144
Desvio standar (mm)	0.47	0	0.52	0.32	0	0.32	0.52	0.32	0.42	0.47	0.32	0.47
error cuadrático (mm)	0.15	0.00	0.16	0.10	0.00	0.10	0.16	0.10	0.13	0.15	0.10	0.15

Tabla 25: tabla de datos y parámetros estadísticos para la superficie de arena fina seca a 5 °

ARENA FINA SECA A 5º												
Coord. Horizontal	425	455	485	517	543	574	607	635	666	694	725	758
Distancia Vertical (mm)	1124	1126	1130	1131	1134	1138	1140	1141	1142	1146	1147	1149
	1124	1126	1130	1131	1135	1138	1140	1142	1142	1147	1147	1150
	1124	1127	1130	1131	1134	1139	1140	1141	1142	1147	1148	1149
	1124	1126	1130	1131	1134	1138	1140	1141	1142	1147	1147	1149
	1124	1125	1130	1131	1134	1138	1140	1141	1142	1147	1147	1149
	1124	1126	1131	1131	1134	1138	1140	1141	1142	1146	1147	1150
	1124	1127	1130	1131	1134	1138	1140	1141	1142	1147	1148	1149
	1124	1126	1130	1131	1134	1139	1140	1141	1142	1147	1147	1150
	1123	1125	1130	1131	1135	1138	1139	1141	1142	1147	1147	1149
1124	1127	1131	1131	1134	1139	1140	1141	1142	1147	1147	1149	
Minimo (mm)	1123	1125	1130	1131	1134	1138	1139	1141	1142	1146	1147	1149
Máximo (mm)	1124	1127	1131	1131	1135	1139	1140	1142	1142	1147	1148	1150
Media (mm)	1123.9	1126.1	1130.2	1131	1134.2	1138.3	1139.9	1141.1	1142	1146.8	1147.2	1149.3
Desvio standar (mm)	0.32	0.74	0.42	0	0.42	0.48	0.32	0.32	0	0.42	0.42	0.48
error cuadrático (mm)	0.10	0.23	0.13	0.00	0.13	0.15	0.10	0.10	0.00	0.13	0.13	0.15

Tabla 26: tabla de datos y parámetros estadísticos para la superficie de arena fina seca a 10 °

ARENA FINA SECA A 10°												
Coord. Horizontal	425	455	487	516	547	577	607	637	665	696	727	757
Distancia Vertical (mm)	1088	1091	1095	1100	1106	1114	1116	1121	1124	1131	1133	1135
	1088	1091	1094	1099	1106	1113	1116	1122	1123	1130	1134	1135
	1088	1091	1095	1099	1106	1112	1116	1122	1124	1130	1134	1134
	1087	1090	1094	1100	1107	1112	1115	1120	1124	1132	1133	1135
	1087	1091	1095	1099	1105	1113	1117	1120	1123	1131	1135	1136
	1088	1091	1095	1099	1106	1112	1116	1122	1125	1131	1134	1135
	1087	1091	1095	1099	1105	1113	1117	1121	1124	1131	1134	1136
	1088	1091	1095	1100	1106	1112	1116	1121	1124	1130	1134	1136
	1087	1091	1095	1099	1106	1112	1116	1121	1125	1130	1134	1134
1087	1091	1094	1100	1105	1113	1116	1121	1123	1131	1133	1136	
Minimo (mm)	1087	1090	1094	1099	1105	1112	1115	1120	1123	1130	1133	1134
Máximo (mm)	1088	1091	1095	1100	1107	1114	1117	1122	1125	1132	1135	1136
Media (mm)	1087.5	1090.9	1094.7	1099.4	1105.8	1112.6	1116.1	1121.1	1123.9	1130.7	1133.8	1135.2
Desvio standar (mm)	0.53	0.32	0.48	0.52	0.63	0.7	0.57	0.74	0.74	0.67	0.63	0.79
error cuadrático (mm)	0.17	0.10	0.15	0.16	0.20	0.22	0.18	0.23	0.23	0.21	0.20	0.25

Tabla 27: tabla de datos y parámetros estadísticos para la superficie de arena fina seca a 15 °

ARENA FINA SECA A 15°												
Coord. Horizontal	428	456	486	517	551	576	607	635	668	698	726	753
Distancia Vertical (mm)	1041	1050	1058	1068	1075	1084	1089	1095	1105	1111	1122	1129
	1040	1050	1057	1068	1075	1084	1089	1095	1105	1112	1122	1128
	1042	1050	1057	1067	1076	1084	1089	1095	1105	1112	1122	1129
	1041	1050	1058	1067	1075	1085	1090	1095	1105	1112	1122	1129
	1041	1050	1057	1069	1076	1084	1088	1094	1105	1112	1123	1129
	1041	1050	1056	1068	1074	1084	1090	1095	1105	1111	1122	1129
	1042	1050	1057	1067	1075	1085	1089	1095	1105	1112	1122	1128
	1042	1050	1056	1068	1075	1084	1090	1095	1105	1112	1122	1129
	1042	1049	1057	1068	1075	1083	1090	1094	1106	1113	1122	1129
1042	1050	1057	1068	1076	1084	1090	1095	1105	1112	1122	1128	
Minimo (mm)	1040	1049	1056	1067	1074	1083	1088	1094	1105	1111	1122	1128
Máximo (mm)	1042	1050	1058	1069	1076	1085	1090	1095	1106	1113	1123	1129
Media (mm)	1041.4	1049.9	1057	1067.8	1075.2	1084.1	1089.4	1094.8	1105.1	1111.9	1122.1	1128.7
Desvio standar (mm)	0.7	0.32	0.67	0.63	0.63	0.57	0.7	0.42	0.32	0.57	0.32	0.48
error cuadrático (mm)	0.22	0.10	0.21	0.20	0.20	0.18	0.22	0.13	0.10	0.18	0.10	0.15

Tabla 28: tabla de datos y parámetros estadísticos para la superficie de arena fina seca a 20 °

ARENA FINA SECA A 20°												
Coord. Horizontal	427	452	485	514	548	575	606	634	666	698	725	753
Distancia Vertical (mm)	1000	1005	1019	1028	1042	1053	1062	1080	1084	1092	1109	1114
	1001	1005	1018	1028	1042	1052	1061	1080	1084	1092	1109	1115
	1001	1005	1019	1028	1042	1053	1061	1079	1084	1092	1110	1114
	1001	1005	1019	1027	1043	1052	1061	1079	1084	1092	1110	1114
	1000	1005	1019	1027	1043	1052	1062	1079	1085	1092	1109	1114
	1000	1005	1019	1027	1042	1053	1061	1079	1084	1092	1109	1114
	1001	1005	1018	1027	1042	1053	1061	1079	1084	1092	1109	1114
	1000	1005	1019	1027	1042	1052	1061	1080	1084	1092	1110	1114
	1000	1005	1019	1027	1043	1053	1062	1079	1084	1092	1109	1114
	1001	1005	1019	1028	1043	1052	1061	1080	1084	1092	1109	1114
Mínimo (mm)	1000	1005	1018	1027	1042	1052	1061	1079	1084	1092	1109	1114
Máximo (mm)	1001	1005	1019	1028	1043	1053	1062	1080	1085	1092	1110	1115
Media (mm)	1000.5	1005	1018.8	1027.4	1042.4	1052.5	1061.3	1079.4	1084.1	1092	1109.3	1114.1
Desvio standar (mm)	0.53	0	0.42	0.52	0.52	0.53	0.48	0.52	0.32	0	0.48	0.32
error cuadrático (mm)	0.17	0.00	0.13	0.16	0.16	0.17	0.15	0.16	0.10	0.00	0.15	0.10

Tabla 29: tabla de datos y parámetros estadísticos para la superficie de arena fina seca a 25 °

ARENA FINA SECA A 25°												
Coord. Horizontal	428	454	487	515	546	577	607	638	666	695	724	757
Distancia Vertical (mm)	951	961	975	987	1007	1016	1034	1049	1058	1076	1091	1099
	951	961	974	987	1007	1016	1034	1049	1057	1076	1090	1099
	951	960	974	986	1007	1016	1034	1048	1058	1076	1091	1099
	950	962	975	987	1006	1016	1035	1049	1057	1076	1092	1098
	950	961	974	987	1007	1016	1034	1049	1057	1077	1091	1098
	951	961	974	987	1006	1015	1035	1049	1057	1076	1091	1099
	951	962	975	986	1006	1015	1035	1049	1057	1077	1091	1099
	951	961	974	986	1007	1016	1035	1048	1057	1076	1091	1098
	951	962	974	987	1007	1016	1035	1049	1057	1076	1091	1099
	951	962	974	987	1006	1016	1035	1048	1058	1076	1091	1099
Mínimo (mm)	950	960	974	986	1006	1015	1034	1048	1057	1076	1090	1098
Máximo (mm)	951	962	975	987	1007	1016	1035	1049	1058	1077	1092	1099
Media (mm)	950.8	961.3	974.3	986.7	1006.6	1015.8	1034.6	1048.7	1057.3	1076.2	1091	1098.7
Desvio standar (mm)	0.42	0.67	0.48	0.48	0.52	0.42	0.52	0.48	0.48	0.42	0.47	0.48
error cuadrático (mm)	0.13	0.21	0.15	0.15	0.16	0.13	0.16	0.15	0.15	0.13	0.15	0.15

Tabla 30: tabla de datos y parámetros estadísticos para la superficie de arena fina seca a 30 °

ARENA FINA SECA A 30°												
Coord. Horizontal	427	455	486	520	547	576	606	635	667	695	726	754
Distancia Vertical (mm)	902	912	934	953	969	983	1004	1015	1036	1053	1076	1090
	901	911	934	954	969	982	1005	1014	1035	1053	1075	1090
	902	912	934	954	969	983	1005	1014	1036	1053	1076	1090
	902	912	934	953	969	982	1005	1015	1035	1053	1075	1090
	901	912	934	953	969	983	1005	1013	1035	1054	1076	1090
	902	912	934	954	969	982	1004	1014	1036	1053	1076	1090
	901	912	934	953	969	982	1004	1014	1035	1053	1075	1090
	901	912	935	953	970	982	1005	1014	1035	1053	1076	1091
	901	912	934	953	969	982	1004	1014	1035	1053	1076	1090
	901	912	934	953	969	982	1005	1013	1036	1053	1076	1090
Minimo (mm)	901	911	934	953	969	982	1004	1013	1035	1053	1075	1090
Máximo (mm)	902	912	935	954	970	983	1005	1015	1036	1054	1076	1091
Media (mm)	901.4	911.9	934.1	953.3	969.1	982.3	1004.6	1014	1035.4	1053.1	1075.7	1090.1
Desvio standar (mm)	0.52	0.32	0.32	0.48	0.32	0.48	0.52	0.67	0.52	0.32	0.48	0.32
error cuadrático (mm)	0.16	0.10	0.10	0.15	0.10	0.15	0.16	0.21	0.16	0.10	0.15	0.10

Tabla 31: tabla de datos y parámetros estadísticos para la superficie de arena gruesa horizontal

ARENA GRUESA SECA HORIZONTAL												
Coord. Horizontal	423	457	485	515	548	573	605	634	665	693	725	756
Distancia Vertical (mm)	1165	1166	1166	1162	1164	1161	1163	1159	1161	1162	1162	1159
	1163	1165	1165	1163	1165	1161	1164	1160	1161	1163	1162	1160
	1166	1166	1165.0	1163	1165	1161	1163	1160	1161	1163	1162	1160
	1166	1165	1164	1163	1165	1161	1164	1160	1161	1162	1162	1160
	1166	1166	1165	1163	1165	1162	1163	1159	1162	1163	1161	1159
	1165	1166	1165	1162	1165	1161	1165	1160	1161	1162	1162	1160
	1166	1166	1165	1162	1164	1161	1163	1160	1161	1162	1161	1160
	1165	1166	1166	1164	1165	1161	1164	1160	1161	1164	1161	1160
	1166	1165	1165	1164	1165	1162	1164	1160	1162	1163	1162	1160
	1166	1165	1166	1163	1165	1161	1164	1160	1161	1163	1161	1160
Minimo (mm)	1163	1165	1164	1162	1164	1161	1163	1159	1161	1162	1161	1159
Máximo (mm)	1166	1166	1166	1164	1165	1162	1165	1160	1162	1164	1162	1160
Media (mm)	1165.4	1165.6	1165.2	1162.9	1164.8	1161.2	1163.7	1159.8	1161.2	1162.7	1161.6	1159.8
Desvio standar (mm)	0.97	0.52	0.63	0.74	0.42	0.42	0.67	0.42	0.42	0.67	0.52	0.42
error cuadrático (mm)	0.31	0.16	0.20	0.23	0.13	0.13	0.21	0.13	0.13	0.21	0.16	0.13

Tabla 32: tabla de datos y parámetros estadísticos para la superficie de arena gruesa seca a 10 °

ARENA GRUESA SECA A 10°												
Coord. Horizontal	424	457	486	515	547	573	606	634	663	694	726	754
Distancia Vertical (mm)	1085	1089	1091	1097	1104	1110	1115	1119	1123	1128	1135	1136
	1085	1089	1091	1097	1104	1109	1114	1119	1123	1130	1135	1136
	1085	1088	1092	1097	1105	1110	1114	1119	1123	1128	1135	1136
	1084	1089	1092	1097	1105	1109	1113	1118	1122	1130	1135	1136
	1085	1089	1091	1097	1104	1108	1114	1119	1123	1129	1135	1136
	1085	1089	1090	1097	1104	1108	1114	1118	1122	1129	1135	1137
	1085	1089	1091	1097	1105	1108	1114	1118	1122	1129	1136	1137
	1086	1087	1092	1097	1104	1108	1114	1119	1123	1128	1135	1137
	1086	1089	1091	1098	1104	1108	1114	1118	1122	1129	1136	1137
	1085	1089	1090	1096	1105	1108	1114	1119	1123	1129	1135	1137
Minimo (mm)	1084	1087	1090	1096	1104	1108	1113	1118	1122	1128	1135	1136
Máximo (mm)	1086	1089	1092	1098	1105	1110	1115	1119	1123	1130	1136	1137
Media (mm)	1085.1	1088.7	1091.1	1097	1104.4	1108.6	1114	1118.6	1122.6	1128.9	1135.2	1136.5
Desvio standar (mm)	0.57	0.67	0.74	0.47	0.52	0.84	0.47	0.52	0.52	0.74	0.42	0.53
error cuadrático (mm)	0.18	0.21	0.23	0.15	0.16	0.27	0.15	0.16	0.16	0.23	0.13	0.17

Tabla 33: tabla de datos y parámetros estadísticos para la superficie de arena gruesa seca a 20 °

ARENA GRUESA SECA A 20°												
Coord. Horizontal	425	456	481	515	547	575	606	638	664	697	726	756
Distancia Vertical (mm)	999	1008	1017	1030	1033	1048	1060	1071	1081	1087	1102	1109
	1000	1008	1017	1029	1033	1049	1059	1071	1080	1086	1101	1107
	1001	1008	1017	1028	1034	1048	1059	1071	1081	1087	1102	1108
	1000	1008	1016	1029	1035	1048	1060	1071	1081	1087	1102	1108
	1000	1008	1017	1027	1033	1048	1058	1071	1080	1087	1101	1108
	1000	1008	1017	1027	1033	1047	1059	1071	1081	1086	1102	1109
	1000	1009	1017	1028	1033	1048	1059	1071	1081	1086	1102	1109
	1000	1008	1016	1028	1033	1048	1060	1071	1082	1087	1101	1109
	1002	1007	1017	1028	1033	1047	1059	1071	1079	1086	1102	1108
	1000	1008	1017	1029	1033	1048	1059	1070	1081	1087	1102	1108
Minimo (mm)	999	1007	1016	1027	1033	1047	1058	1070	1079	1086	1101	1107
Máximo (mm)	1002	1009	1017	1030	1035	1049	1060	1071	1082	1087	1102	1109
Media (mm)	1000.2	1008	1016.8	1028.3	1033.3	1047.9	1059.2	1070.9	1080.7	1086.6	1101.7	1108.3
Desvio standar (mm)	0.79	0.47	0.42	0.95	0.67	0.57	0.63	0.32	0.82	0.52	0.48	0.67
error cuadrático (mm)	0.25	0.15	0.13	0.30	0.21	0.18	0.20	0.10	0.26	0.16	0.15	0.21

Tabla 34: tabla de datos y parámetros estadísticos para la superficie de arena gruesa seca a 30 °

ARENA GRUESA SECA A 30°												
Coord. Horizontal	426	456	486	517	548	575	604	633	666	693	722	758
Distancia Vertical (mm)	898	914	920	954	960	970	992	1013	1029	1042	1068	1083
	897	914	921	953	960	970	992	1013	1029	1044	1069	1083
	899	913	920	954	960	971	994	1013	1030	1043	1068	1082
	898	914	920	954	960	970	993	1013	1029	1042	1069	1083
	897	913	920	954	959	972	992	1014	1029	1043	1068	1084
	898	914	920	954	960	970	992	1013	1030	1043	1068	1083
	899	914	920	954	959	970	993	1012	1030	1043	1068	1084
	898	914	920	954	959	970	993	1013	1028	1043	1068	1083
	897	913	920	953	958	971	992	1013	1029	1043	1068	1083
897	915	920	953	960	970	992	1012	1030	1042	1068	1083	
Mínimo (mm)	897	913	920	953	958	970	992	1012	1028	1042	1068	1082
Máximo (mm)	899	915	921	954	960	972	994	1014	1030	1044	1069	1084
Media (mm)	897.8	913.8	920.1	953.7	959.5	970.4	992.5	1012.9	1029.3	1042.8	1068.2	1083.1
Desvio standar (mm)	0.79	0.63	0.32	0.48	0.71	0.7	0.71	0.57	0.67	0.63	0.42	0.57
error cuadrático (mm)	0.25	0.20	0.10	0.15	0.22	0.22	0.22	0.18	0.21	0.20	0.13	0.18

ANEXO II

Secciones relevadas con distanciómetro en los experimentos realizados sobre un canal rectilíneo.

Tabla 35: Mediciones correspondientes al ensayo N° 1

Ql (l/s)	1.320	C =	0.114		
Qs (gr/s)	0.150				
S =	0.0025				
S. inicial	Grande				
Xp (m)	Z1 (m)	Z2 (m)	Z3 (m)	Z4 (m)	Z5 (m)
-0.350	0.182	0.181	0.182	0.181	0.177
-0.340	0.182	0.181	0.182	0.181	0.168
-0.330	0.182	0.181	0.182	0.181	0.161
-0.320	0.182	0.181	0.182	0.173	0.154
-0.310	0.182	0.181	0.171	0.161	0.147
-0.300	0.182	0.181	0.161	0.154	0.141
-0.290	0.177	0.181	0.154	0.158	0.141
-0.280	0.168	0.181	0.156	0.154	0.147
-0.270	0.161	0.176	0.156	0.151	0.146
-0.260	0.152	0.165	0.156	0.149	0.147
-0.250	0.151	0.161	0.153	0.151	0.149
-0.240	0.154	0.156	0.147	0.152	0.150
-0.230	0.157	0.158	0.145	0.152	0.149
-0.220	0.157	0.158	0.146	0.150	0.151
-0.210	0.156	0.156	0.150	0.148	0.149
-0.200	0.151	0.155	0.152	0.148	0.148
-0.190	0.149	0.153	0.150	0.150	0.150
-0.180	0.148	0.151	0.146	0.146	0.149
-0.170	0.146	0.149	0.141	0.145	0.147
-0.160	0.144	0.146	0.140	0.150	0.150
-0.150	0.142	0.143	0.145	0.148	0.149
-0.140	0.143	0.142	0.150	0.150	0.143
-0.130	0.144	0.138	0.150	0.150	0.136
-0.120	0.143	0.134	0.151	0.150	0.136
-0.110	0.141	0.138	0.150	0.151	0.141
-0.100	0.144	0.143	0.148	0.150	0.144
-0.090	0.147	0.146	0.145	0.151	0.147
-0.080	0.147	0.145	0.144	0.151	0.147
-0.070	0.148	0.141	0.142	0.149	0.147
-0.060	0.150	0.141	0.139	0.147	0.147
-0.050	0.151	0.145	0.136	0.143	0.147
-0.040	0.151	0.145	0.132	0.139	0.148
-0.030	0.151	0.148	0.130	0.134	0.149

Xp (m)	Z1 (m)	Z2 (m)	Z3 (m)	Z4 (m)	Z5 (m)
-0.020	0.151	0.151	0.133	0.131	0.144
-0.010	0.150	0.152	0.138	0.129	0.137
0.000	0.148	0.152	0.142	0.130	0.135
0.010	0.146	0.153	0.146	0.129	0.134
0.020	0.144	0.154	0.147	0.129	0.138
0.030	0.143	0.153	0.149	0.130	0.137
0.040	0.146	0.153	0.145	0.139	0.135
0.050	0.146	0.152	0.148	0.144	0.132
0.060	0.144	0.152	0.150	0.146	0.130
0.070	0.145	0.150	0.147	0.146	0.132
0.080	0.144	0.147	0.145	0.143	0.136
0.090	0.137	0.145	0.142	0.139	0.138
0.100	0.133	0.144	0.140	0.137	0.142
0.110	0.133	0.143	0.139	0.139	0.140
0.120	0.139	0.141	0.142	0.141	0.138
0.130	0.143	0.138	0.141	0.140	0.137
0.140	0.146	0.135	0.139	0.140	0.140
0.150	0.146	0.137	0.139	0.141	0.143
0.160	0.145	0.139	0.139	0.143	0.145
0.170	0.147	0.142	0.139	0.144	0.148
0.180	0.147	0.144	0.140	0.145	0.149
0.190	0.145	0.145	0.141	0.146	0.150
0.200	0.146	0.147	0.143	0.147	0.154
0.210	0.148	0.143	0.143	0.149	0.155
0.220	0.148	0.142	0.143	0.152	0.151
0.230	0.149	0.145	0.146	0.154	0.148
0.240	0.148	0.146	0.150	0.154	0.152
0.250	0.149	0.147	0.148	0.156	0.153
0.260	0.151	0.144	0.148	0.158	0.156
0.270	0.153	0.142	0.153	0.159	0.156
0.280	0.154	0.142	0.155	0.158	0.161
0.290	0.151	0.142	0.158	0.161	0.176
0.300	0.152	0.147	0.161	0.175	0.176
0.310	0.155	0.151	0.175	0.175	0.176
0.320	0.161	0.156	0.175	0.175	0.176
0.330	0.176	0.154	0.175	0.175	0.176
0.340	0.180	0.161	0.175	0.175	0.176
0.350	0.180	0.178	0.175	0.175	0.176

Tabla 36: Mediciones correspondientes al ensayo N° 2

ENSAYO 3				
Ql (l/s)	0.630	C =	0.302	
Qs (gr/s)	0.190			
S =	0.0025			
S. Inicial	Chica			
Xp (m)	Z1 (m)	Z2 (m)	Z3 (m)	Z4 (m)
-0.290	0.169	0.169	0.173	0.172
-0.280	0.169	0.169	0.173	0.163
-0.270	0.165	0.165	0.173	0.150
-0.260	0.169	0.152	0.173	0.150
-0.250	0.158	0.147	0.162	0.152
-0.240	0.154	0.147	0.155	0.152
-0.230	0.149	0.152	0.155	0.150
-0.220	0.147	0.153	0.153	0.150
-0.210	0.152	0.153	0.150	0.149
-0.200	0.155	0.154	0.149	0.149
-0.190	0.152	0.153	0.151	0.149
-0.180	0.151	0.154	0.151	0.150
-0.170	0.148	0.154	0.150	0.148
-0.160	0.149	0.154	0.149	0.148
-0.150	0.150	0.152	0.150	0.147
-0.140	0.152	0.151	0.151	0.148
-0.130	0.151	0.150	0.151	0.151
-0.120	0.153	0.149	0.152	0.153
-0.110	0.155	0.146	0.152	0.153
-0.100	0.155	0.146	0.150	0.154
-0.090	0.154	0.151	0.150	0.151
-0.080	0.155	0.148	0.152	0.146
-0.070	0.156	0.150	0.153	0.140
-0.060	0.154	0.151	0.153	0.141
-0.050	0.154	0.154	0.154	0.144
-0.040	0.155	0.155	0.153	0.144
-0.030	0.155	0.154	0.154	0.148
-0.020	0.155	0.155	0.154	0.152
-0.010	0.153	0.155	0.153	0.152
0.000	0.153	0.154	0.153	0.151
0.010	0.150	0.153	0.150	0.148
0.020	0.149	0.153	0.149	0.144
0.030	0.152	0.152	0.151	0.146
0.040	0.153	0.151	0.148	0.144
0.050	0.151	0.149	0.147	0.146
0.060	0.147	0.148	0.146	0.148
0.070	0.148	0.148	0.147	0.148

Xp (m)	Z1 (m)	Z2 (m)	Z3 (m)	Z4 (m)
0.080	0.154	0.149	0.147	0.148
0.090	0.152	0.148	0.146	0.150
0.100	0.150	0.146	0.147	0.151
0.110	0.148	0.147	0.147	0.150
0.120	0.147	0.149	0.146	0.149
0.130	0.151	0.151	0.140	0.150
0.140	0.154	0.150	0.140	0.151
0.150	0.154	0.151	0.141	0.146
0.160	0.154	0.152	0.142	0.147
0.170	0.156	0.153	0.146	0.153
0.180	0.155	0.155	0.148	0.154
0.190	0.154	0.156	0.152	0.155
0.200	0.155	0.158	0.153	0.154
0.210	0.156	0.158	0.156	0.153
0.220	0.158	0.157	0.155	0.153
0.230	0.159	0.157	0.152	0.151
0.240	0.158	0.156	0.153	0.152
0.250	0.165	0.165	0.162	0.150
0.260	0.172	0.172	0.171	0.152
0.270	0.172	0.172	0.177	0.155
0.280	0.172	0.172	0.177	0.163
0.290	0.172	0.172	0.177	0.177

Tabla 37: Mediciones correspondientes al ensayo N° 3

ENSAYO 4				
Ql (l/s)	0.880	C =	0.443	
Qs (gr/s)	0.390			
S =	0.0040			
S. Inicial	Chica			
Xp (m)	Z1 (m)	Z2 (m)	Z3 (m)	Z4 (m)
-0.350	0.181	0.175	0.180	0.170
-0.340	0.181	0.175	0.180	0.164
-0.330	0.181	0.175	0.180	0.155
-0.320	0.181	0.175	0.180	0.153
-0.310	0.181	0.171	0.164	0.149
-0.300	0.181	0.164	0.159	0.147
-0.290	0.181	0.156	0.150	0.145
-0.280	0.181	0.157	0.146	0.147
-0.270	0.181	0.157	0.140	0.145
-0.260	0.174	0.158	0.139	0.146
-0.250	0.164	0.156	0.141	0.147
-0.240	0.158	0.156	0.142	0.148
-0.230	0.156	0.155	0.148	0.148
-0.220	0.157	0.153	0.148	0.148
-0.210	0.158	0.152	0.148	0.147
-0.200	0.159	0.150	0.148	0.148
-0.190	0.157	0.146	0.144	0.150
-0.180	0.154	0.149	0.138	0.150
-0.170	0.147	0.146	0.135	0.151
-0.160	0.145	0.142	0.138	0.147
-0.150	0.142	0.143	0.142	0.144
-0.140	0.140	0.144	0.142	0.146
-0.130	0.144	0.141	0.147	0.150
-0.120	0.149	0.138	0.152	0.152
-0.110	0.150	0.139	0.153	0.153
-0.100	0.150	0.141	0.152	0.153

Xp (m)	Z1 (m)	Z2 (m)	Z3 (m)	Z4 (m)
-0.090	0.154	0.144	0.152	0.150
-0.080	0.153	0.149	0.151	0.149
-0.070	0.150	0.149	0.148	0.151
-0.060	0.152	0.151	0.147	0.147
-0.050	0.150	0.150	0.150	0.150
-0.040	0.155	0.147	0.148	0.149
-0.030	0.156	0.149	0.146	0.149
-0.020	0.155	0.149	0.147	0.147
-0.010	0.158	0.148	0.148	0.147
0.000	0.157	0.144	0.149	0.149
0.010	0.157	0.144	0.151	0.148
0.020	0.157	0.144	0.153	0.151
0.030	0.150	0.149	0.153	0.152
0.040	0.148	0.147	0.151	0.149
0.050	0.145	0.147	0.151	0.150
0.060	0.143	0.145	0.146	0.152
0.070	0.140	0.145	0.148	0.151
0.080	0.140	0.148	0.152	0.153
0.090	0.141	0.148	0.151	0.156
0.100	0.141	0.149	0.150	0.158
0.110	0.142	0.150	0.152	0.157
0.120	0.147	0.145	0.155	0.157
0.130	0.147	0.140	0.157	0.158
0.140	0.145	0.140	0.156	0.156
0.150	0.145	0.143	0.156	0.156
0.160	0.142	0.147	0.156	0.157
0.170	0.138	0.153	0.157	0.159
0.180	0.138	0.154	0.158	0.156
0.190	0.138	0.155	0.159	0.158
0.200	0.133	0.155	0.159	0.159
0.210	0.132	0.155	0.159	0.158
0.220	0.135	0.157	0.160	0.158

Xp (m)	Z1 (m)	Z2 (m)	Z3 (m)	Z4 (m)
0.230	0.139	0.157	0.160	0.158
0.240	0.144	0.157	0.159	0.157
0.250	0.146	0.155	0.159	0.157
0.260	0.148	0.155	0.159	0.157
0.270	0.151	0.160	0.158	0.154
0.280	0.154	0.158	0.157	0.152
0.290	0.159	0.159	0.154	0.154
0.300	0.162	0.157	0.156	0.154
0.310	0.164	0.157	0.158	0.155
0.320	0.174	0.164	0.157	0.164
0.330	0.174	0.175	0.160	0.175
0.340	0.174	0.175	0.164	0.175
0.350	0.174	0.175	0.178	0.175

Tabla 38: Mediciones correspondientes al ensayo N° 4

ENSAYO 5				
Ql (l/s)	1.140	C =	0.140	
Qs (gr/s)	0.160			
S =	0.0040			
S. Inicial	Grande			
Xp (m)	Z1 (m)	Z2 (m)	Z3 (m)	Z4 (m)
-0.335	0.171	0.171	0.173	0.171
-0.325	0.171	0.171	0.169	0.171
-0.315	0.171	0.173	0.159	0.167
-0.305	0.162	0.166	0.152	0.159
-0.295	0.159	0.159	0.151	0.157
-0.285	0.158	0.158	0.152	0.157
-0.275	0.158	0.155	0.152	0.156
-0.265	0.157	0.151	0.154	0.153
-0.255	0.154	0.148	0.151	0.154
-0.245	0.148	0.145	0.145	0.150
-0.235	0.149	0.144	0.142	0.147
-0.225	0.146	0.146	0.144	0.148
-0.215	0.145	0.148	0.145	0.147
-0.205	0.145	0.147	0.147	0.145
-0.195	0.144	0.150	0.152	0.145
-0.185	0.145	0.151	0.149	0.144
-0.175	0.144	0.151	0.147	0.141
-0.165	0.142	0.152	0.150	0.138
-0.155	0.142	0.149	0.148	0.138
-0.145	0.146	0.145	0.150	0.139
-0.135	0.144	0.143	0.151	0.138
-0.125	0.143	0.143	0.149	0.136
-0.115	0.142	0.144	0.151	0.136
-0.105	0.138	0.146	0.152	0.137
-0.095	0.135	0.144	0.152	0.137
-0.085	0.136	0.141	0.153	0.139

Xp (m)	Z1 (m)	Z2 (m)	Z3 (m)	Z4 (m)
-0.075	0.140	0.144	0.153	0.142
-0.065	0.141	0.139	0.154	0.145
-0.055	0.143	0.137	0.153	0.146
-0.045	0.143	0.140	0.153	0.147
-0.035	0.142	0.142	0.150	0.149
-0.025	0.142	0.147	0.151	0.149
-0.015	0.144	0.149	0.151	0.152
-0.005	0.145	0.150	0.149	0.154
0.005	0.144	0.150	0.148	0.153
0.015	0.140	0.151	0.146	0.151
0.025	0.137	0.150	0.144	0.149
0.035	0.135	0.150	0.143	0.147
0.045	0.135	0.148	0.139	0.149
0.055	0.136	0.147	0.135	0.146
0.065	0.140	0.146	0.130	0.147
0.075	0.143	0.148	0.129	0.145
0.085	0.142	0.150	0.131	0.146
0.095	0.146	0.150	0.132	0.147
0.105	0.152	0.148	0.134	0.146
0.115	0.151	0.147	0.138	0.142
0.125	0.152	0.146	0.142	0.140
0.135	0.153	0.148	0.139	0.140
0.145	0.154	0.145	0.141	0.142
0.155	0.153	0.143	0.144	0.143
0.165	0.154	0.141	0.144	0.145
0.175	0.154	0.143	0.147	0.141
0.185	0.153	0.147	0.151	0.142
0.195	0.156	0.149	0.148	0.141
0.205	0.156	0.150	0.144	0.143
0.215	0.156	0.154	0.145	0.145
0.225	0.157	0.159	0.144	0.142
0.235	0.155	0.166	0.146	0.144

Xp (m)	Z1 (m)	Z2 (m)	Z3 (m)	Z4 (m)
0.245	0.159	0.171	0.150	0.146
0.255	0.162	0.171	0.151	0.149
0.265	0.171	0.171	0.149	0.150
0.275	0.171	0.171	0.146	0.150
0.285	0.171	0.171	0.150	0.151
0.295	0.171	0.171	0.159	0.149
0.305	0.171	0.171	0.166	0.151
0.315	0.171	0.171	0.171	0.159
0.325	0.171	0.171	0.171	0.163
0.335	0.171	0.171	0.171	0.171

Tabla 39: Mediciones correspondientes al ensayo N° 5

ENSAYO 6				
Ql (l/s)	0.930	C =	0.072	
Qs (gr/s)	0.067			
S =	0.0015			
S. Inicial	Grande			
Xp (m)	Z1 (m)	Z2 (m)	Z3 (m)	Z4 (m)
-0.240	0.174	0.173	0.173	0.174
-0.230	0.163	0.173	0.163	0.163
-0.220	0.157	0.173	0.156	0.155
-0.210	0.158	0.163	0.155	0.154
-0.200	0.159	0.158	0.157	0.148
-0.190	0.155	0.159	0.156	0.144
-0.180	0.151	0.158	0.152	0.143
-0.170	0.147	0.154	0.150	0.142
-0.160	0.143	0.151	0.151	0.141
-0.150	0.142	0.149	0.151	0.138
-0.140	0.143	0.145	0.148	0.137
-0.130	0.143	0.143	0.146	0.142
-0.120	0.142	0.143	0.146	0.148
-0.110	0.143	0.140	0.146	0.147
-0.100	0.143	0.138	0.142	0.148
-0.090	0.143	0.139	0.137	0.148
-0.080	0.147	0.142	0.139	0.148
-0.070	0.147	0.144	0.138	0.144
-0.060	0.146	0.148	0.140	0.141
-0.050	0.148	0.149	0.143	0.142
-0.040	0.146	0.149	0.140	0.140
-0.030	0.145	0.143	0.138	0.137
-0.020	0.143	0.143	0.138	0.137
-0.010	0.136	0.140	0.140	0.136
0.000	0.132	0.144	0.144	0.135
0.010	0.131	0.143	0.148	0.134

Xp (m)	Z1 (m)	Z2 (m)	Z3 (m)	Z4 (m)
0.020	0.134	0.142	0.145	0.132
0.030	0.140	0.139	0.142	0.133
0.040	0.148	0.138	0.138	0.136
0.050	0.150	0.135	0.140	0.138
0.060	0.147	0.138	0.142	0.139
0.070	0.143	0.141	0.140	0.143
0.080	0.142	0.143	0.142	0.144
0.090	0.140	0.141	0.139	0.145
0.100	0.143	0.143	0.139	0.147
0.110	0.143	0.147	0.140	0.145
0.120	0.146	0.148	0.142	0.145
0.130	0.146	0.144	0.147	0.141
0.140	0.146	0.144	0.150	0.143
0.150	0.146	0.147	0.151	0.145
0.160	0.146	0.149	0.146	0.147
0.170	0.148	0.152	0.145	0.149
0.180	0.151	0.152	0.152	0.152
0.190	0.152	0.151	0.151	0.155
0.200	0.151	0.151	0.148	0.157
0.210	0.157	0.155	0.150	0.152
0.220	0.163	0.158	0.152	0.153
0.230	0.171	0.163	0.163	0.163
0.240	0.173	0.173	0.173	0.173

Tabla 40: Mediciones correspondientes al ensayo N° 6

ENSAYO 7				
Ql (l/s)	0.630	C =	0.175	
Qs (gr/s)	0.110			
S =	0.0015			
S. Inicial	Chica			
Xp (m)	Z1 (m)	Z2 (m)	Z3 (m)	Z4 (m)
-0.250	0.186	0.186	0.186	0.186
-0.240	0.176	0.176	0.176	0.176
-0.230	0.176	0.171	0.175	0.176
-0.220	0.176	0.163	0.175	0.175
-0.210	0.170	0.155	0.163	0.163
-0.200	0.163	0.157	0.160	0.159
-0.190	0.160	0.156	0.159	0.160
-0.180	0.155	0.154	0.159	0.160
-0.170	0.150	0.152	0.159	0.158
-0.160	0.146	0.152	0.158	0.154
-0.150	0.147	0.149	0.158	0.155
-0.140	0.149	0.149	0.158	0.152
-0.130	0.151	0.150	0.158	0.148
-0.120	0.148	0.152	0.157	0.146
-0.110	0.148	0.150	0.154	0.149
-0.100	0.147	0.152	0.151	0.149
-0.090	0.147	0.152	0.148	0.149
-0.080	0.148	0.151	0.143	0.148
-0.070	0.148	0.150	0.141	0.149
-0.060	0.147	0.149	0.142	0.152
-0.050	0.149	0.147	0.146	0.154
-0.040	0.148	0.146	0.147	0.154
-0.030	0.146	0.147	0.150	0.153
-0.020	0.145	0.149	0.152	0.153
-0.010	0.147	0.150	0.155	0.154
0.000	0.147	0.145	0.156	0.153

Xp (m)	Z1 (m)	Z2 (m)	Z3 (m)	Z4 (m)
0.010	0.149	0.139	0.157	0.153
0.020	0.153	0.134	0.156	0.152
0.030	0.155	0.134	0.153	0.149
0.040	0.156	0.136	0.152	0.145
0.050	0.157	0.142	0.152	0.143
0.060	0.159	0.147	0.154	0.138
0.070	0.159	0.147	0.155	0.136
0.080	0.159	0.150	0.155	0.149
0.090	0.160	0.146	0.154	0.147
0.100	0.160	0.145	0.153	0.154
0.110	0.161	0.151	0.146	0.154
0.120	0.160	0.153	0.142	0.154
0.130	0.161	0.155	0.137	0.153
0.140	0.161	0.157	0.139	0.151
0.150	0.161	0.157	0.144	0.150
0.160	0.159	0.158	0.147	0.155
0.170	0.156	0.163	0.151	0.154
0.180	0.159	0.170	0.155	0.155
0.190	0.163	0.174	0.163	0.156
0.200	0.175	0.176	0.171	0.155
0.210	0.176	0.176	0.176	0.156
0.220	0.176	0.176	0.176	0.156
0.230	0.176	0.176	0.176	0.163
0.240	0.176	0.176	0.176	0.176
0.250	0.186	0.186	0.186	0.186

ANEXO III

Configuraciones geométricas en planta a partir de las cuales se alcanza el equilibrio hidrosedimentológico en el canal experimental, a partir de las combinaciones de pendiente y caudal detalladas en la Tabla 9

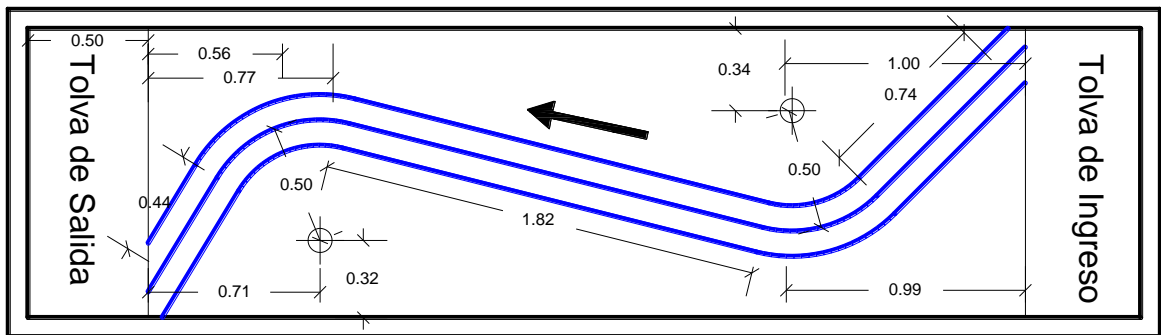


Figura 100: Geometría 1

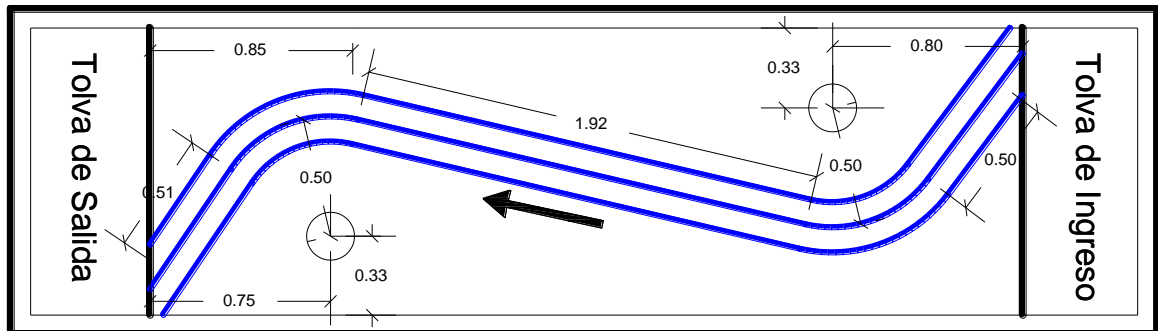


Figura 101: Geometría 2

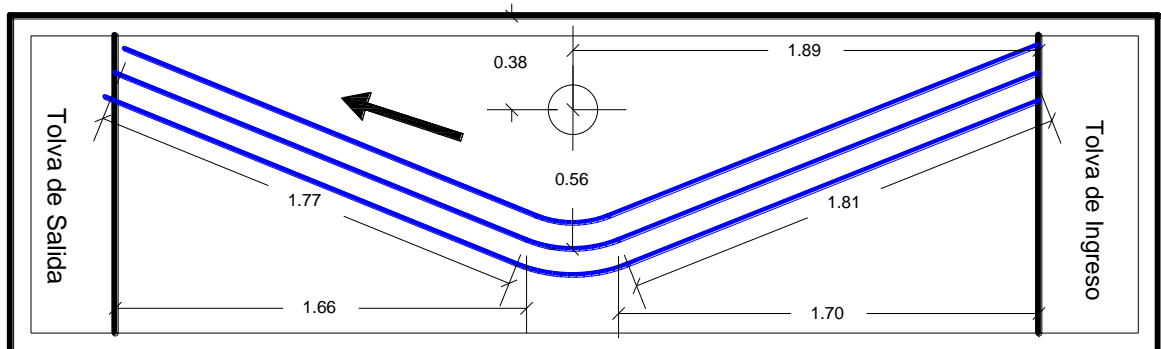


Figura 102: Geometría 3

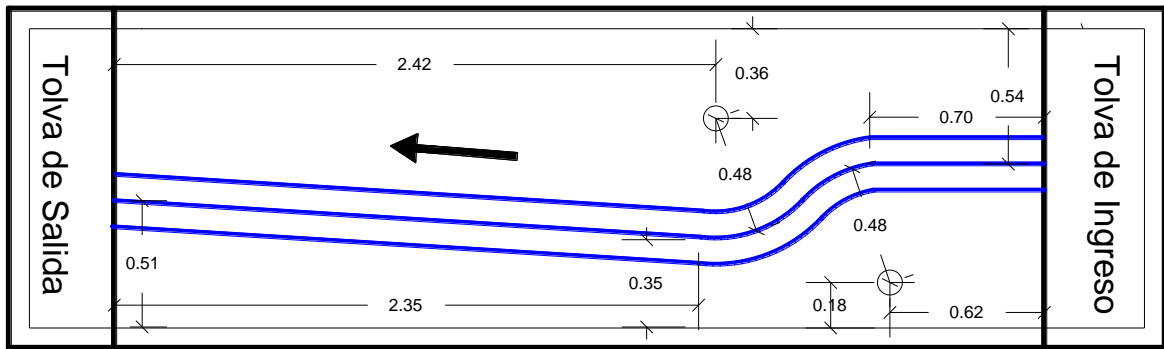


Figura 103: Geometría 4

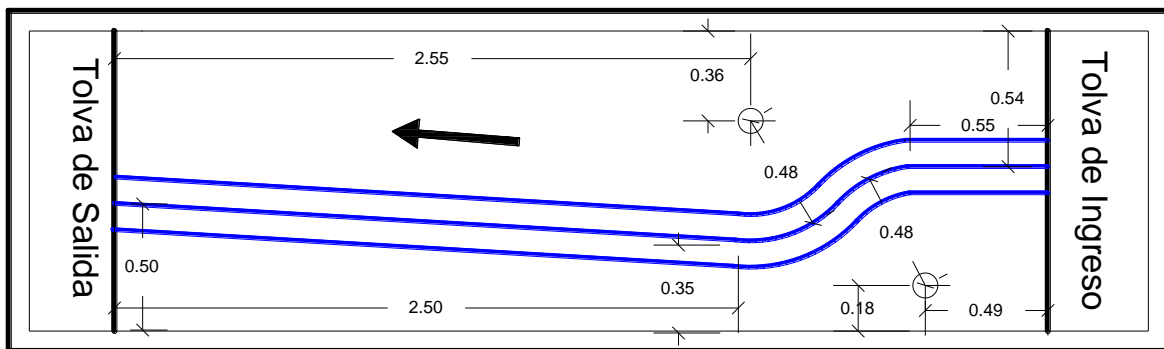


Figura 104: Geometría 5

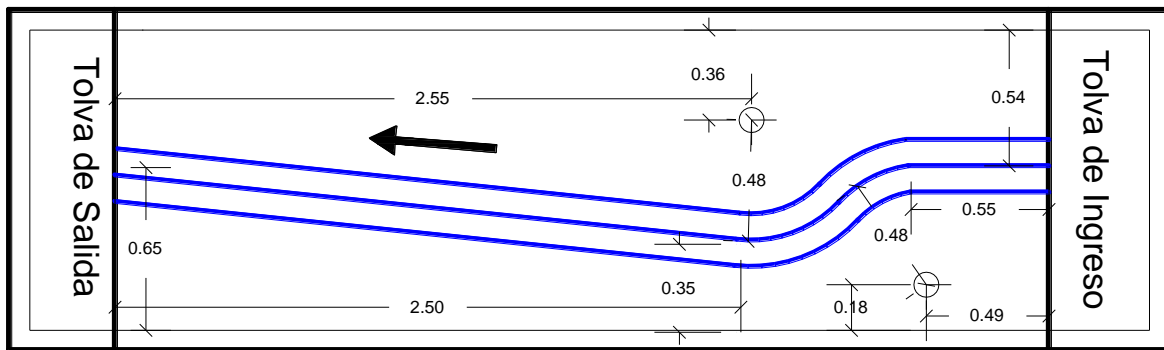


Figura 105: Geometría 6

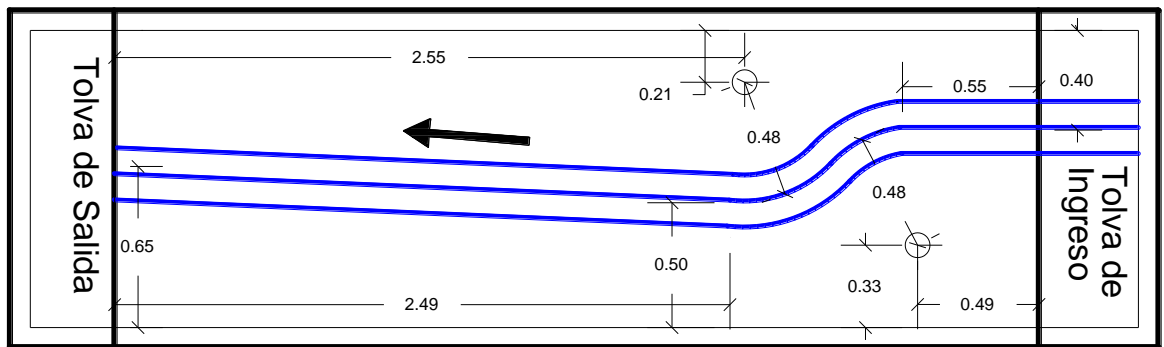


Figura 106: Geometría 7

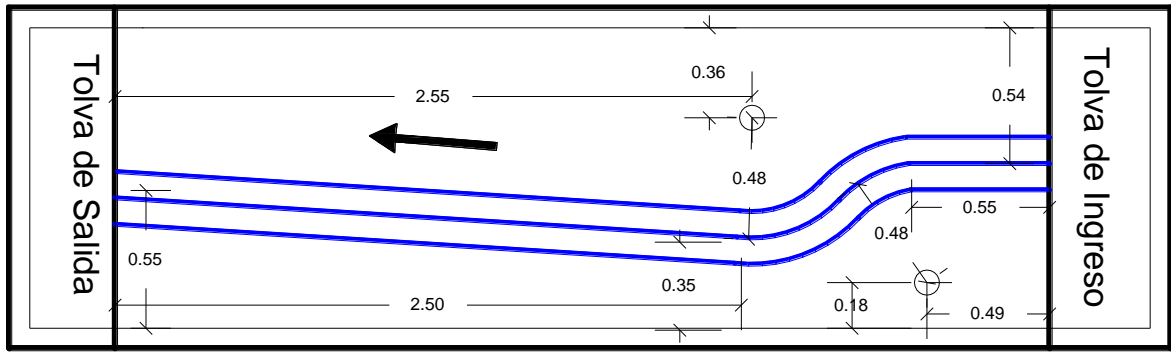


Figura 107: Geometría 8

ANEXO IV

Relevamientos realizados sobre los experimentos descritos en la Tabla 9 en formato raster.

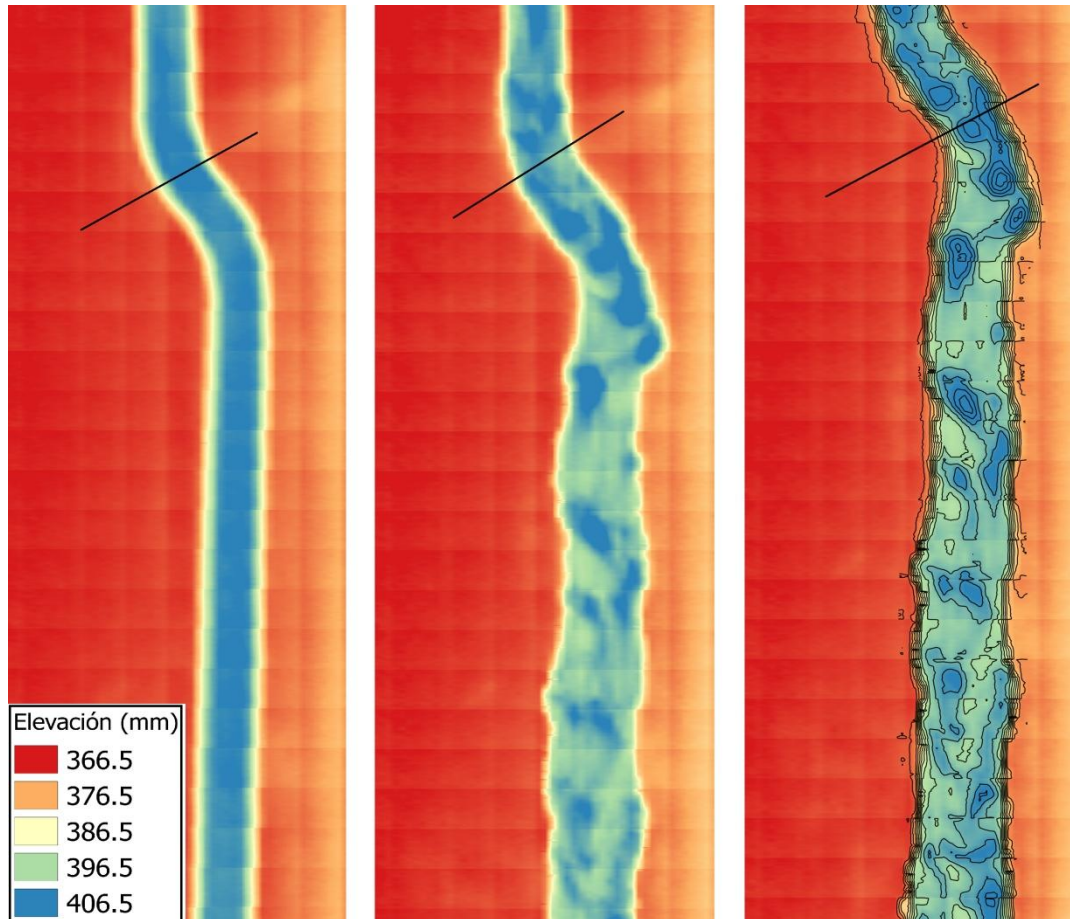


Figura 108: a la izquierda el relevamiento previo al comienzo del experimento, al centro la geometría luego de culminado el experimento y a la derecha se adicionaron las curvas de nivel. Se experimentó con la Geometría 6, una caudal de 0.20 l/s y una pendiente de 0.6 %

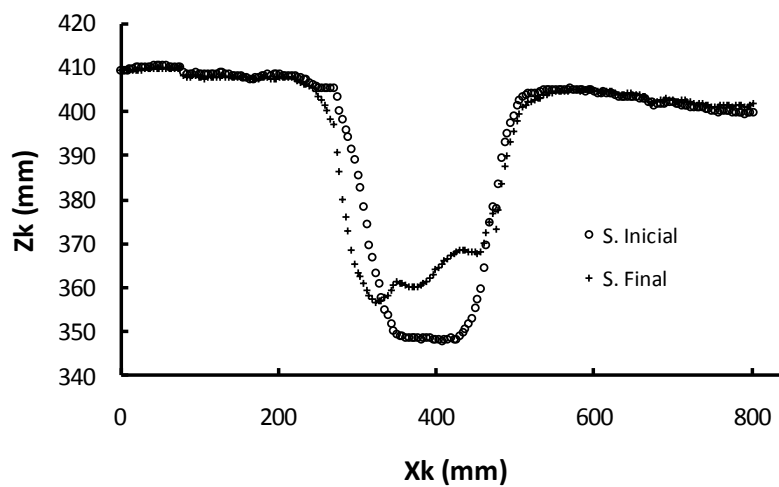


Figura 109: Los dos perfiles señalados en planta en la Figura 108.

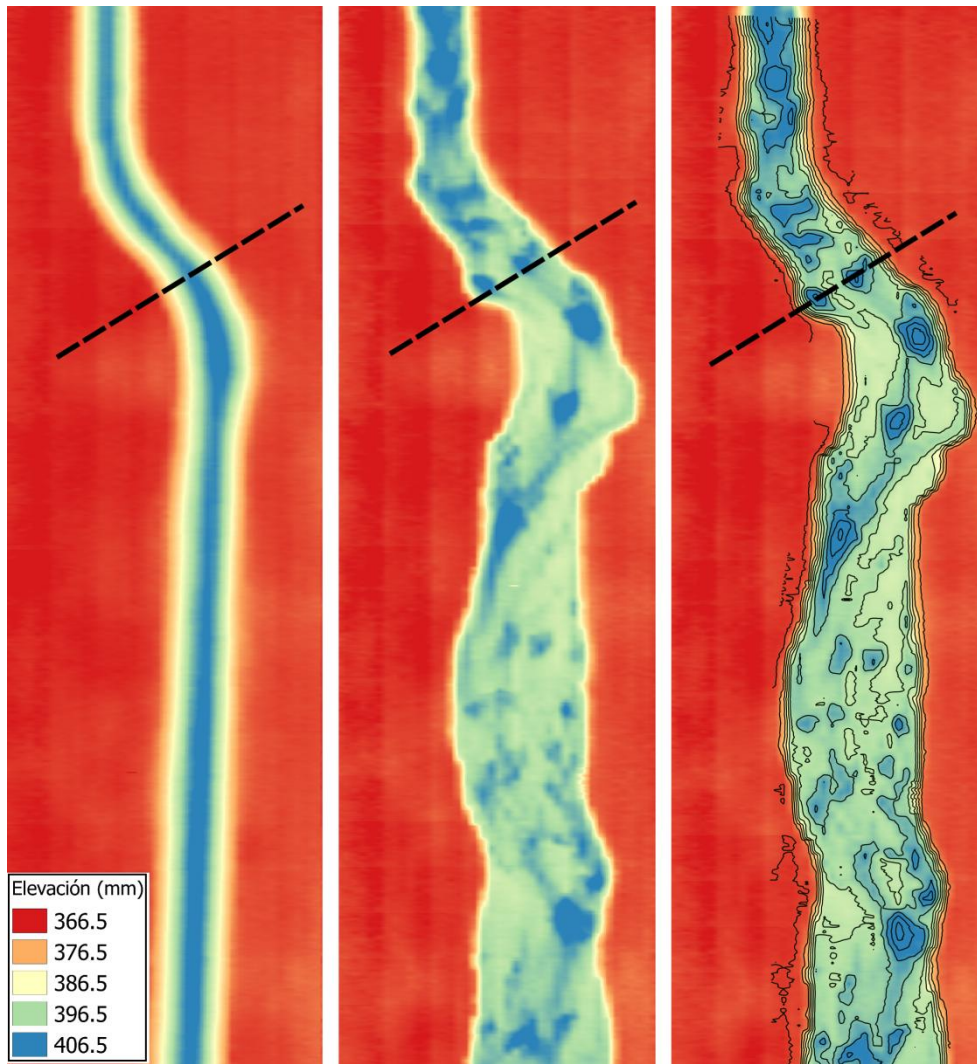


Figura 110: a la izquierda el relevamiento previo al comienzo del experimento, al centro la geometría luego de culminado el experimento y a la derecha se adicionaron las curvas de nivel.. Se experimentó con la Geometría 6, una caudal de 0.16 l/s y una pendiente de 0.6 %

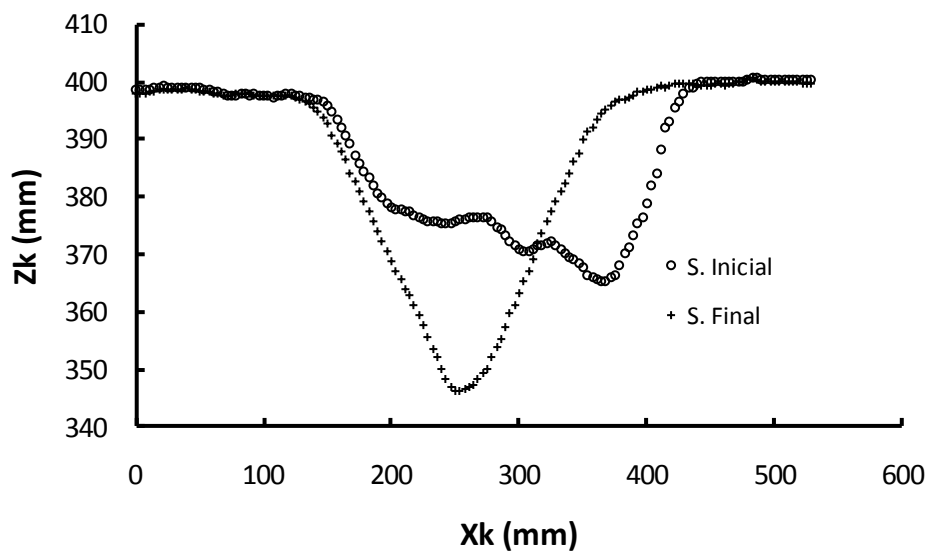


Figura 111: Los dos perfiles señalados en planta en la Figura 110.

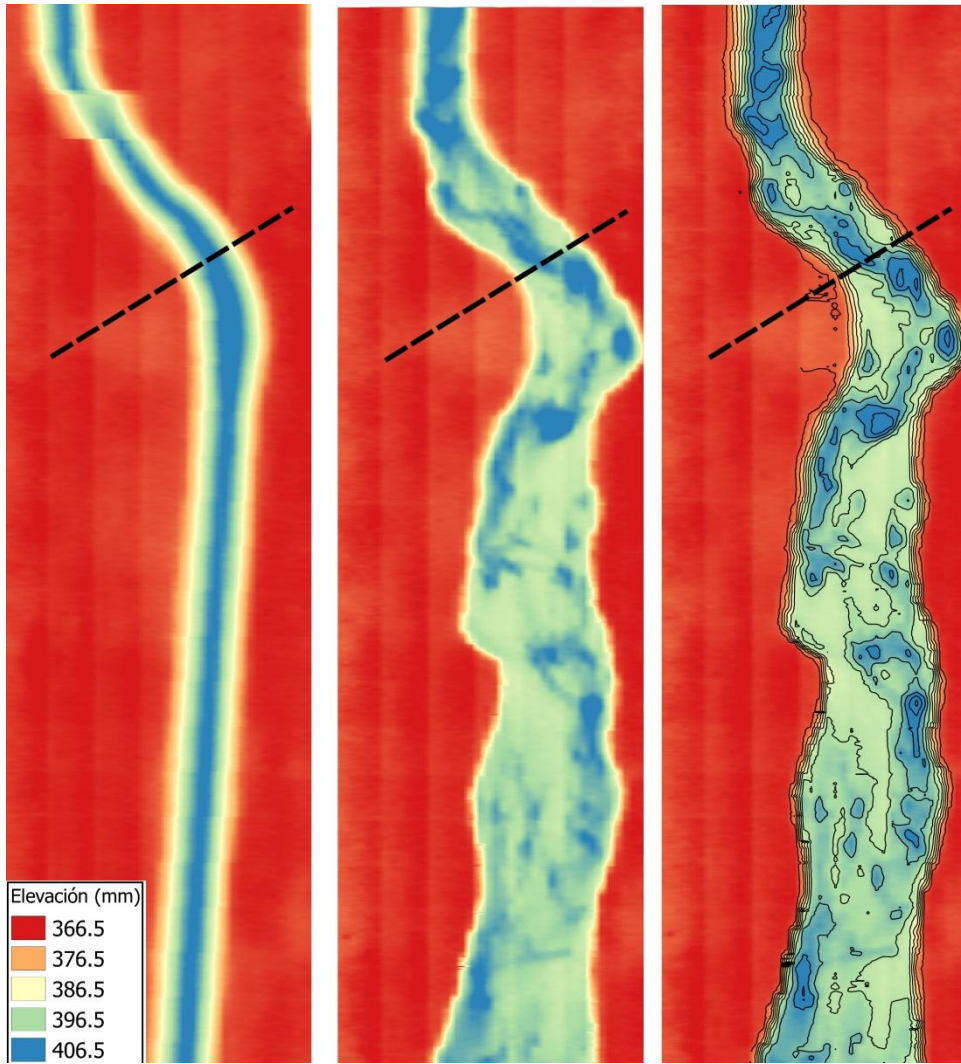


Figura 112: a la izquierda el relevamiento previo al comienzo del experimento, al centro la geometría luego de culminado el experimento y a la derecha se adicionaron las curvas de nivel. Se experimentó con la Geometría 8, una caudal de 0.20 l/s y una pendiente de 0.6 %

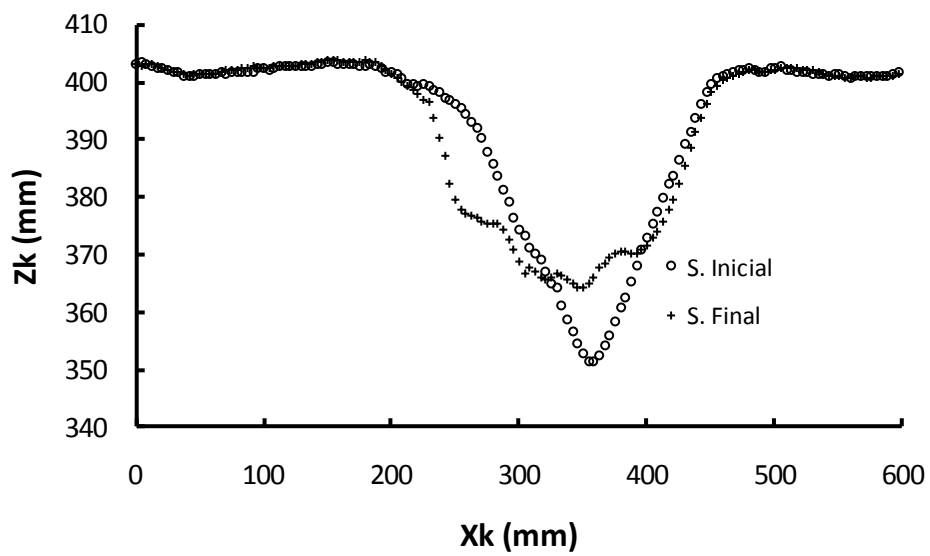


Figura 113: Los dos perfiles señalados en planta en la Figura 112.

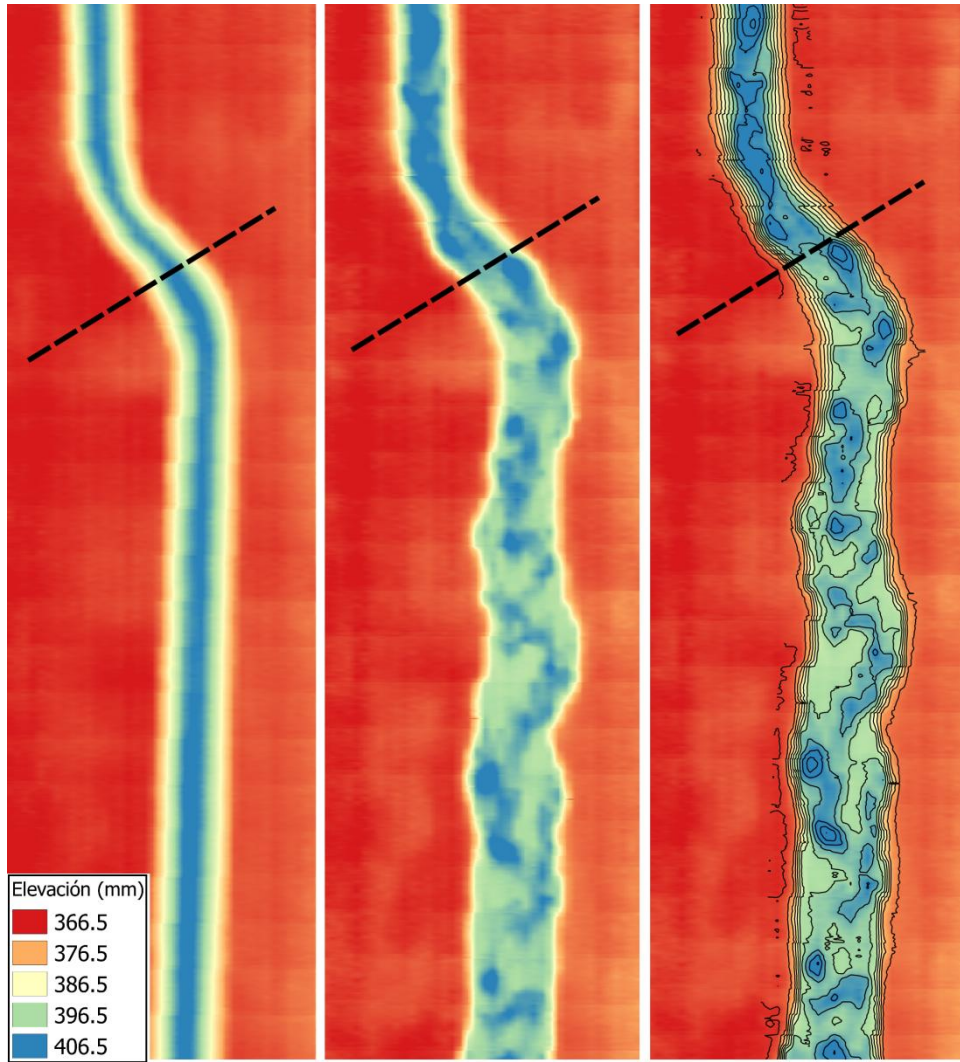


Figura 114: a la izquierda el relevamiento previo al comienzo del experimento, al centro la geometría luego de culminado el experimento y a la derecha se adicionaron las curvas de nivel. Se experimentó con la Geometría 8, una caudal de 0.13 l/s y una pendiente de 0.6 %

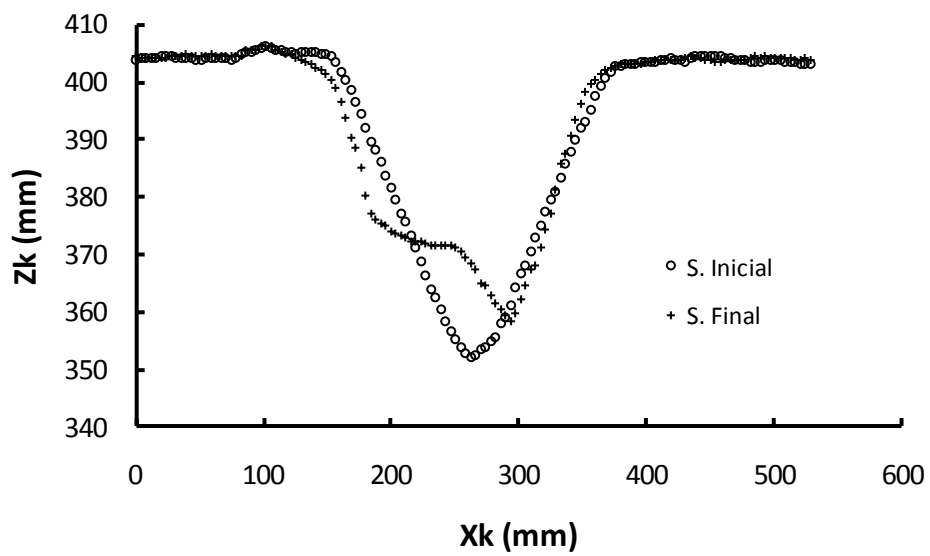


Figura 115: Los dos perfiles señalados en planta en la Figura 114.

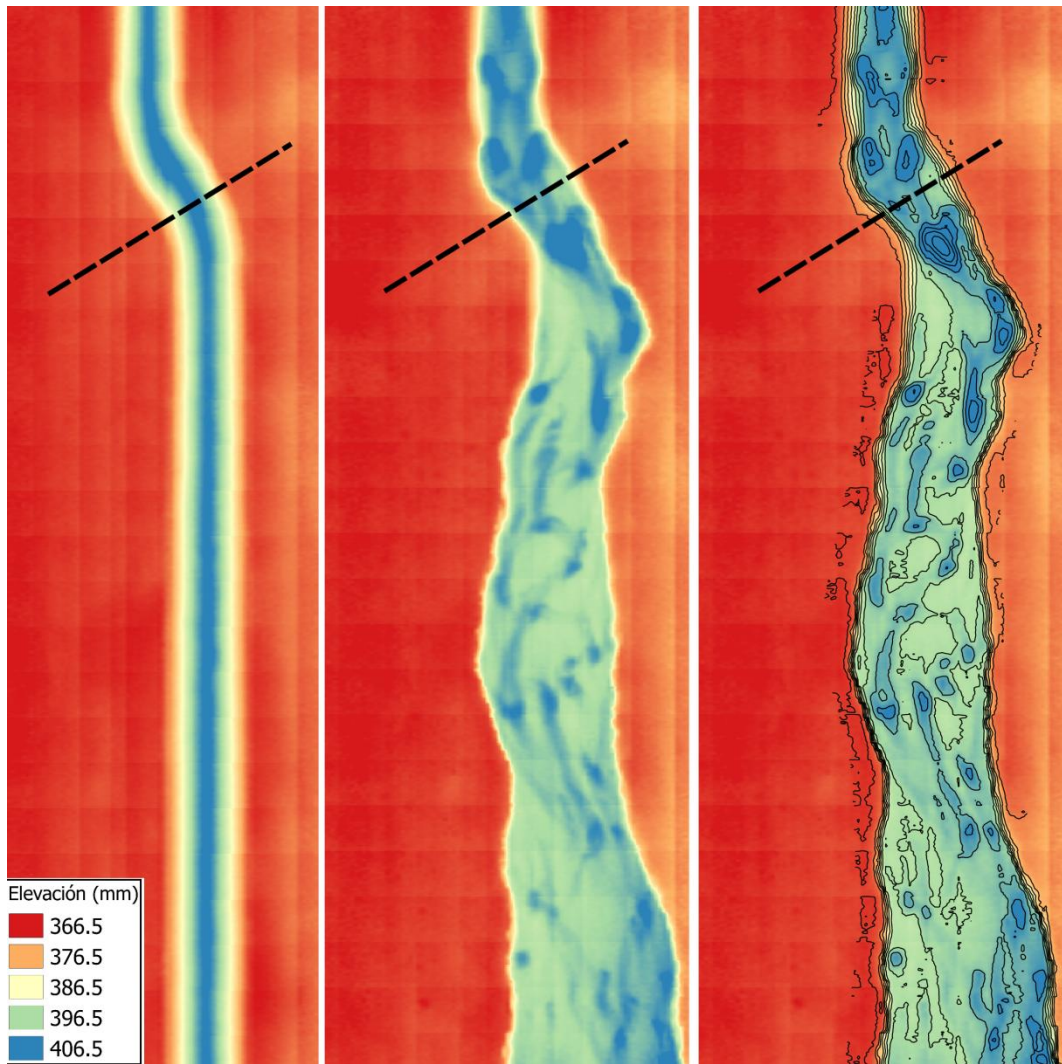


Figura 116: a la izquierda el relevamiento previo al comienzo del experimento, al centro la geometría luego de culminado el experimento y a la derecha se adicionaron las curvas de nivel. Se experimentó con la Geometría 6, una caudal de 0.15 l/s y una pendiente de 0.9 %

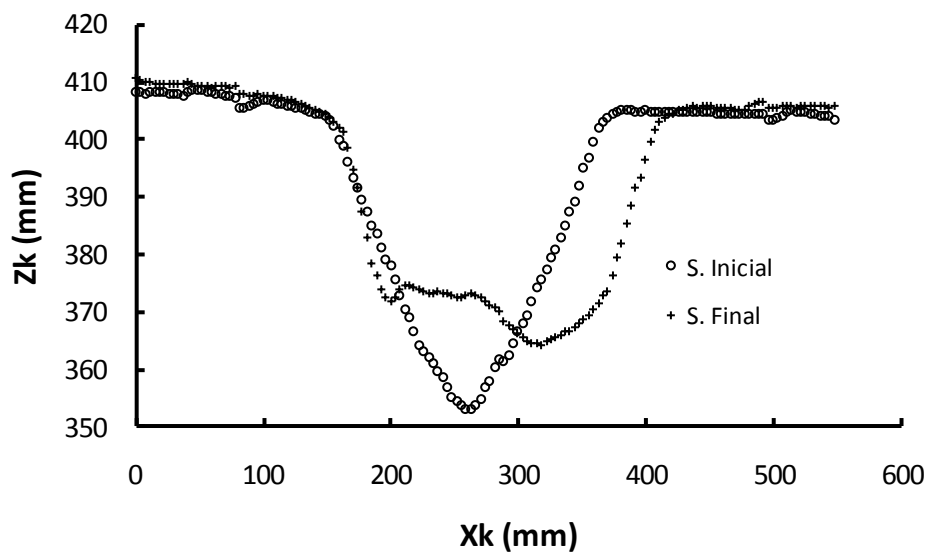


Figura 117: Los dos perfiles señalados en planta en la Figura 116.

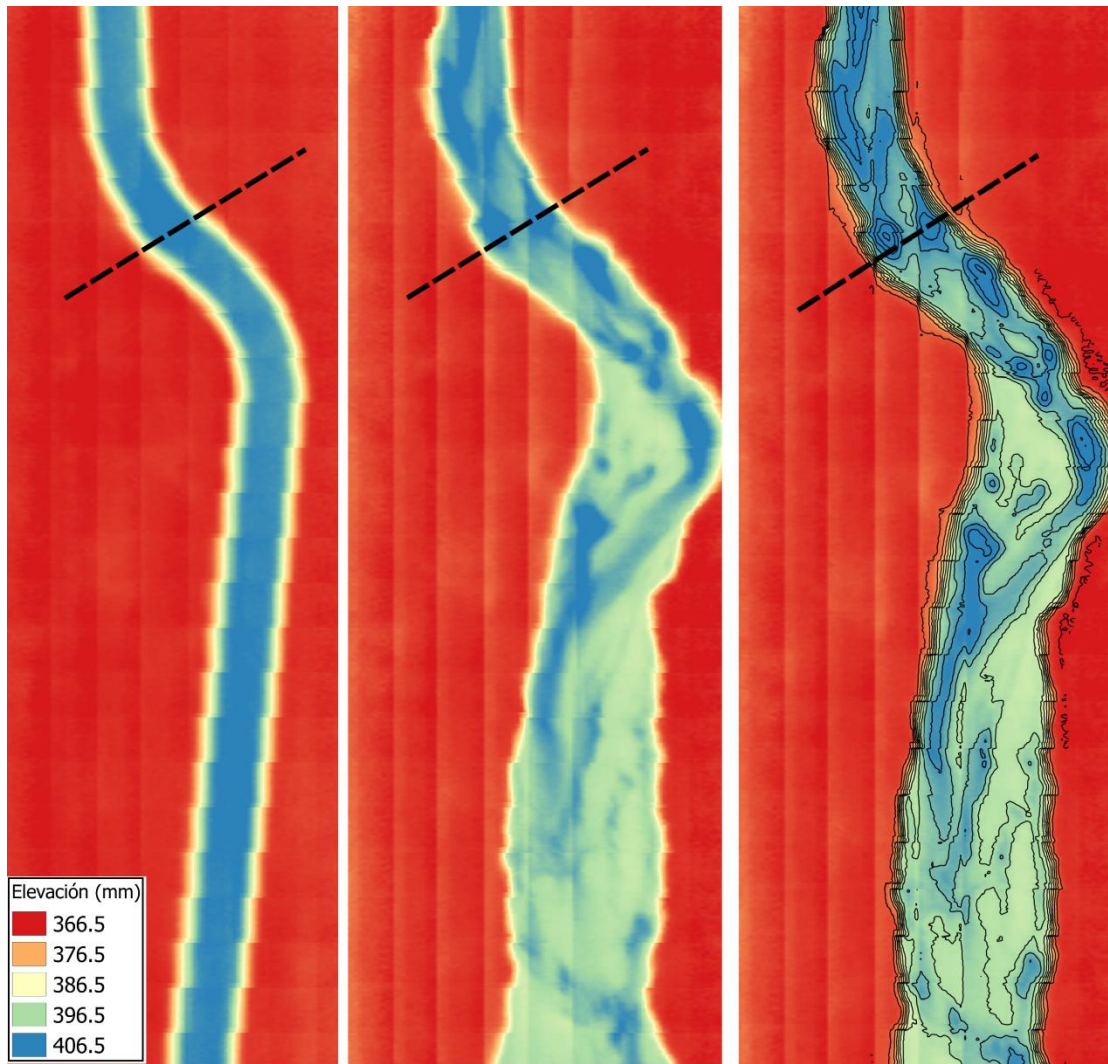


Figura 118: a la izquierda el relevamiento previo al comienzo del experimento, al centro la geometría luego de culminado el experimento y a la derecha se adicionaron las curvas de nivel. Se experimentó con la Geometría 8, una caudal de 0.20 l/s y una pendiente de 0.9 %

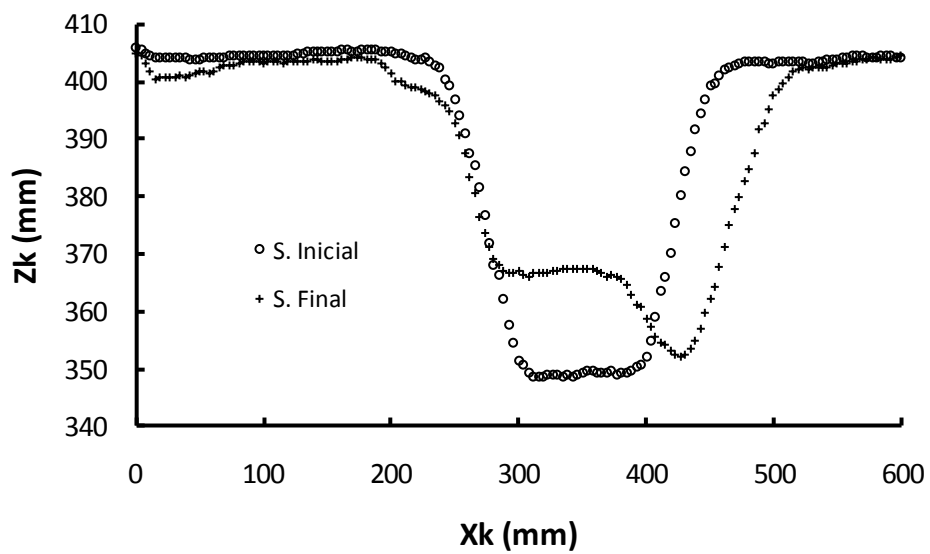


Figura 119: Los dos perfiles señalados en planta en la Figura 118.

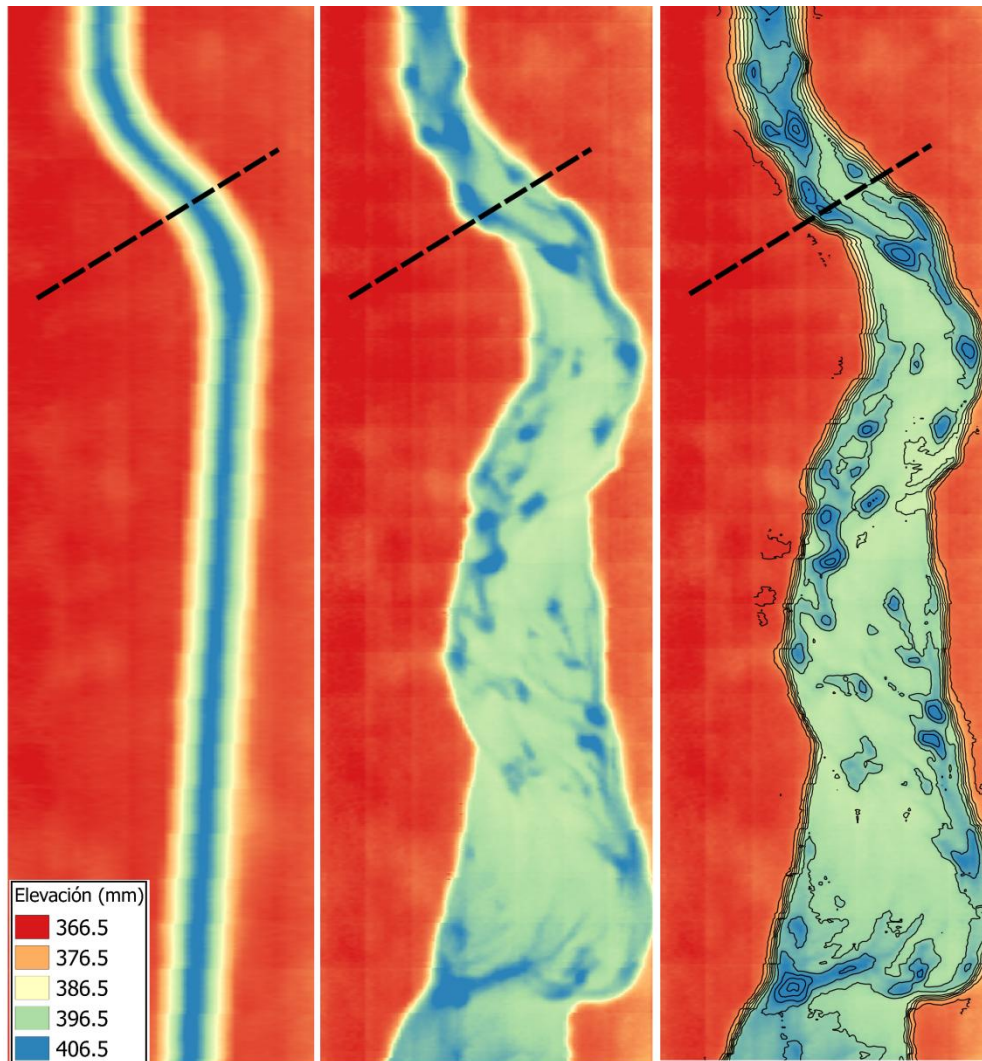


Figura 120: a la izquierda el relevamiento previo al comienzo del experimento, al centro la geometría luego de culminado el experimento y a la derecha se adicionaron las curvas de nivel. Se experimentó con la Geometría 8, una caudal de 0.15 l/s y una pendiente de 0.9 %

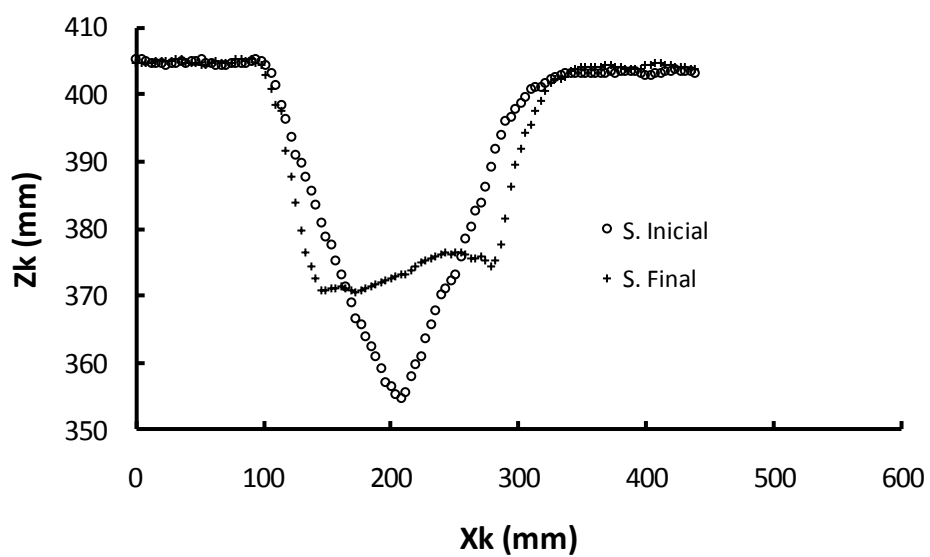


Figura 121: Los dos perfiles señalados en planta en la Figura 120.

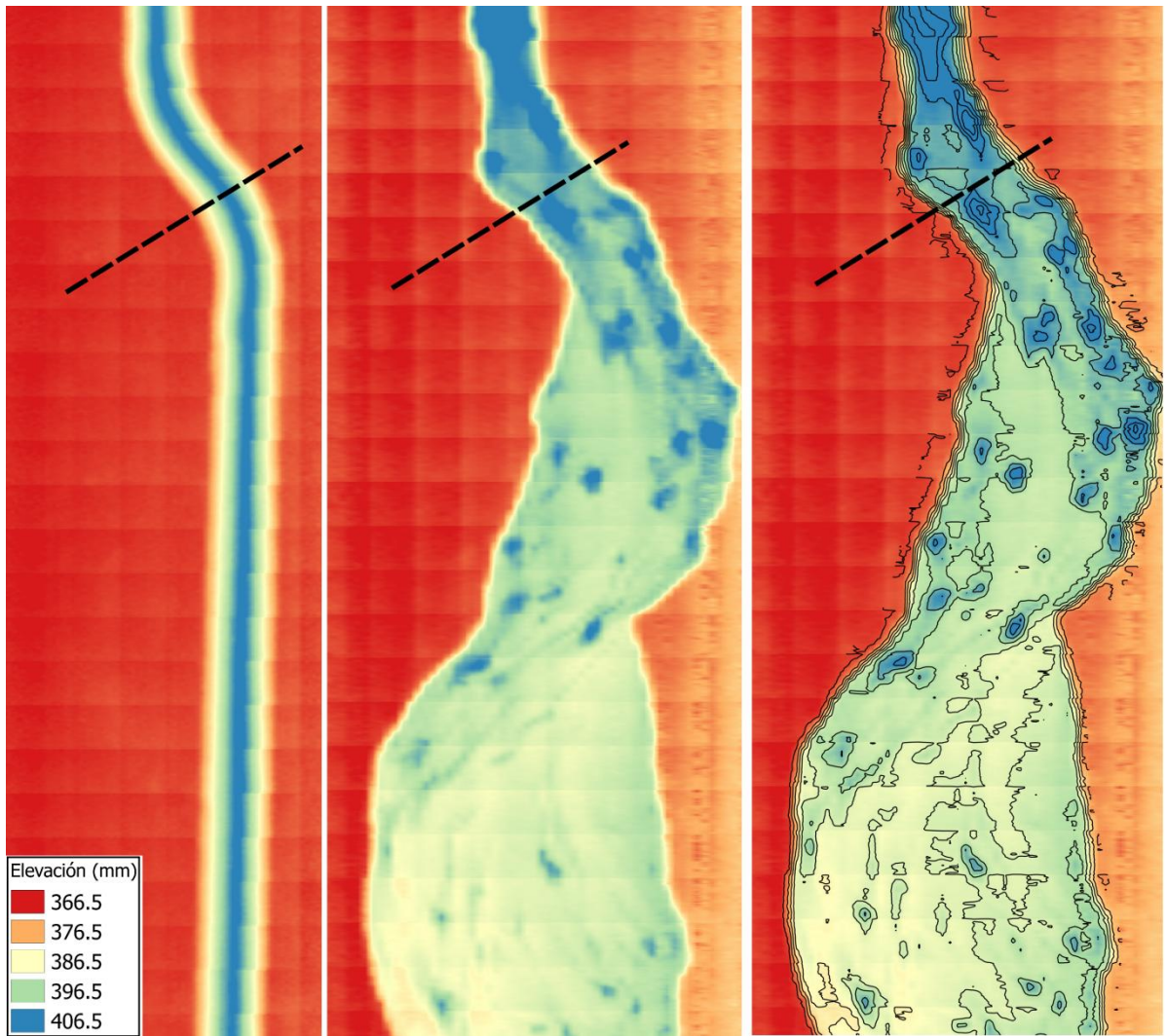


Figura 122: a la izquierda el relevamiento previo al comienzo del experimento, al centro la geometría luego de culminado el experimento y a la derecha se adicionaron las curvas de nivel. Se experimentó con la Geometría 8, una caudal de 0.13 l/s y una pendiente de 0.9 %

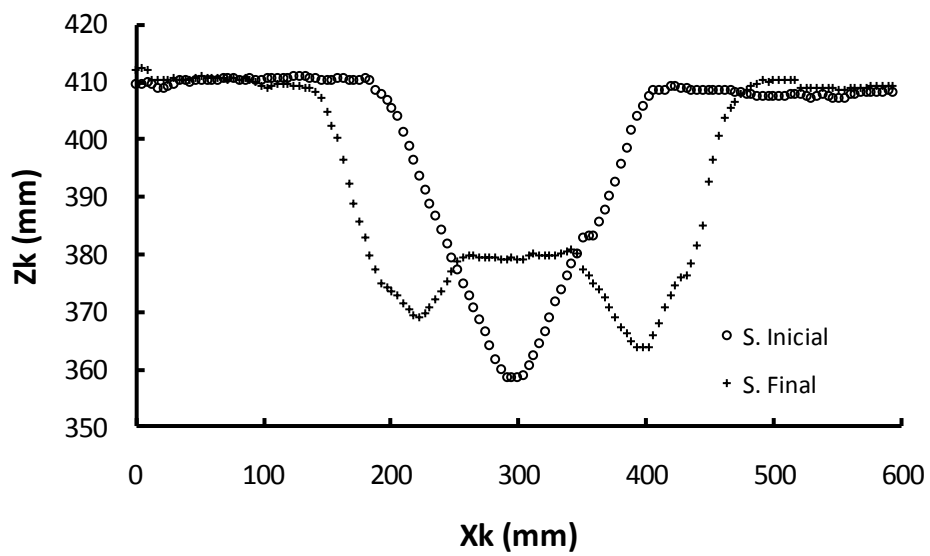


Figura 123: Los dos perfiles señalados en planta en la Figura 122.

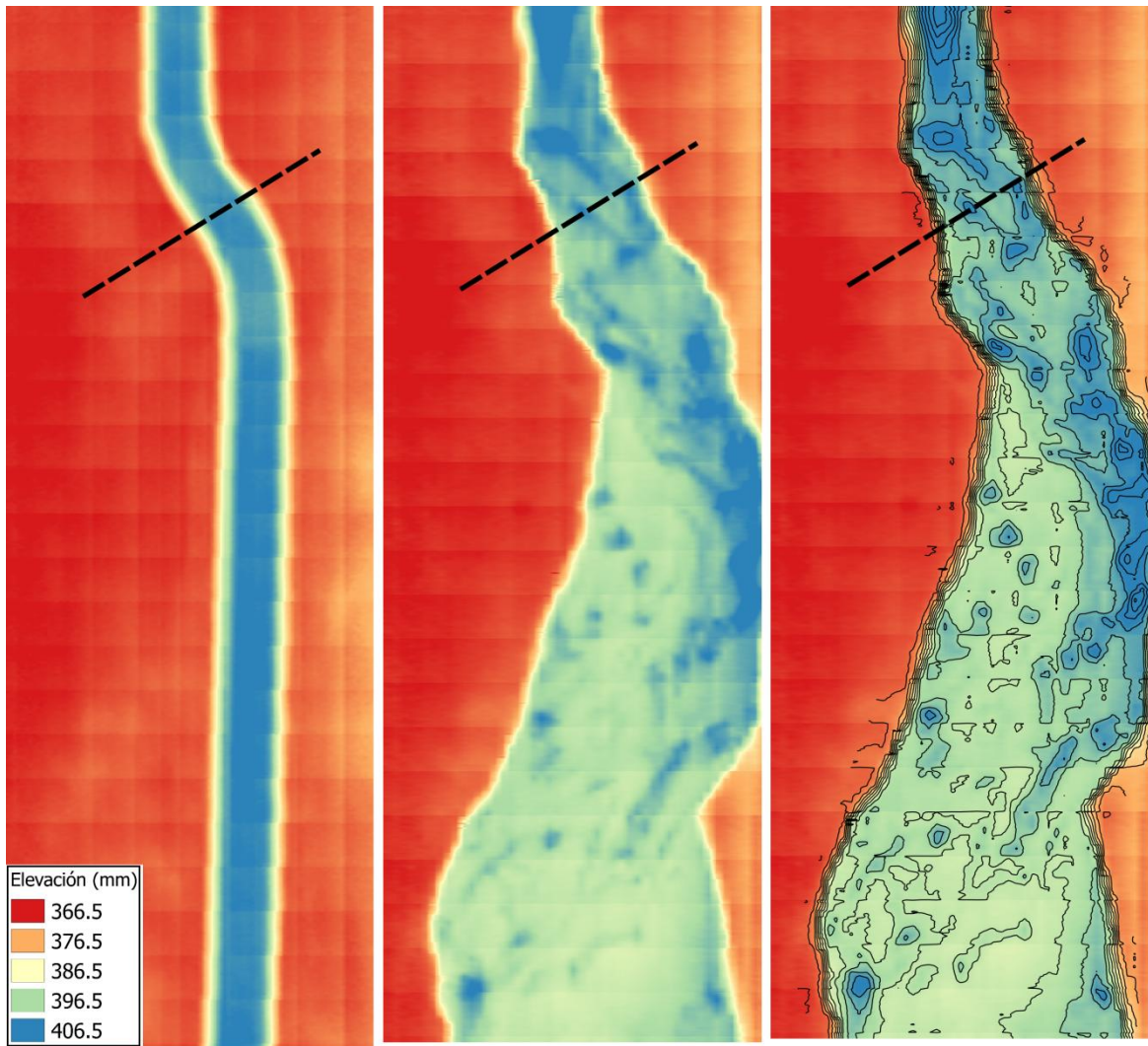


Figura 124: a la izquierda el relevamiento previo al comienzo del experimento, al centro la geometría luego de culminado el experimento y a la derecha se adicionaron las curvas de nivel. Se experimentó con la Geometría 6, una caudal de 0.24 l/s y una pendiente de 1.2 %

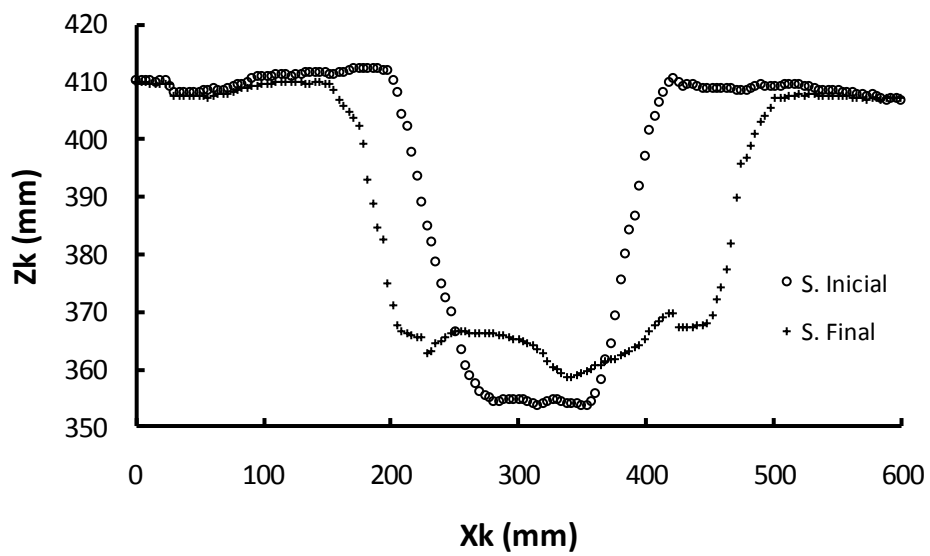


Figura 125: Los dos perfiles señalados en planta en la Figura 124.

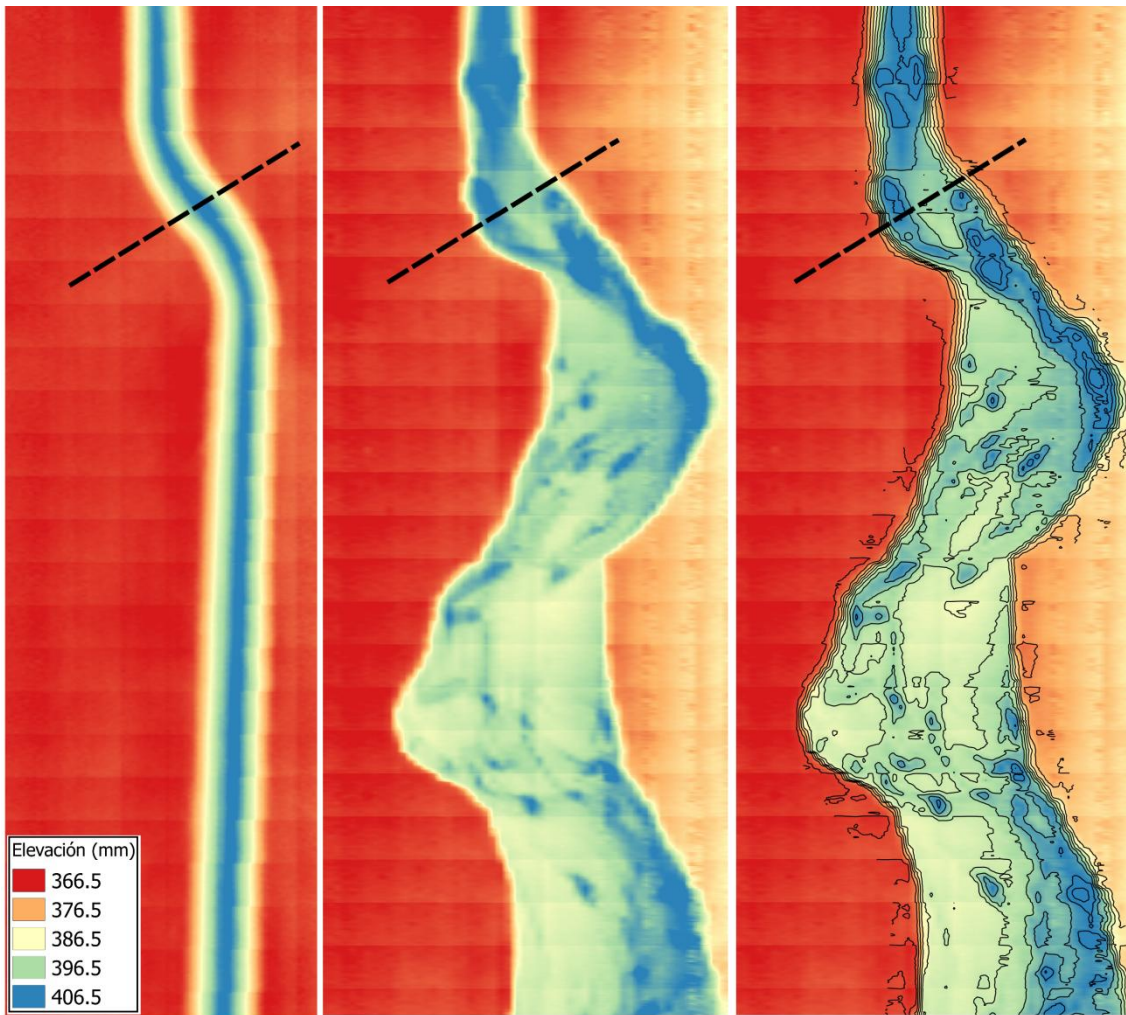


Figura 126: a la izquierda el relevamiento previo al comienzo del experimento, al centro la geometría luego de culminado el experimento y a la derecha se adicionaron las curvas de nivel. Se experimentó con la Geometría 6, una caudal de 0.16 l/s y una pendiente de 1.2 %

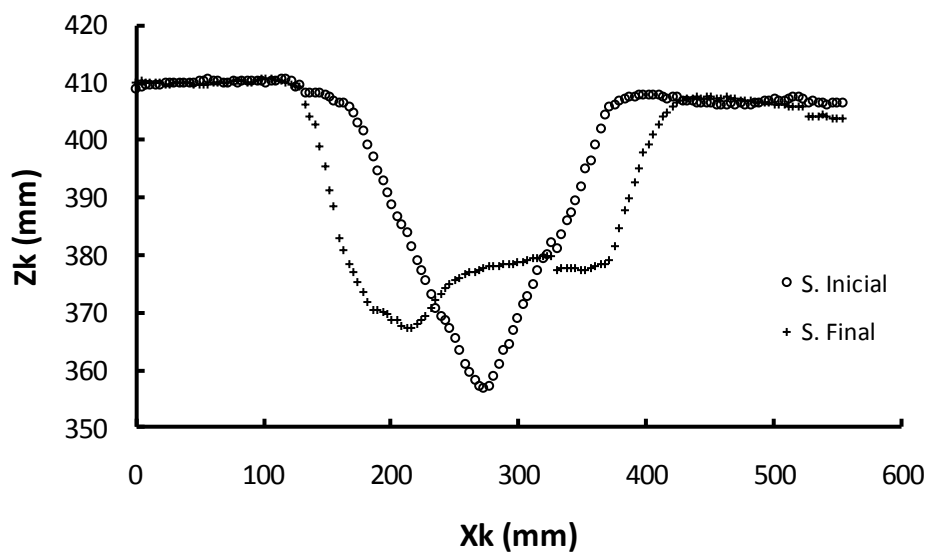


Figura 127: Los dos perfiles señalados en planta en la Figura 126.

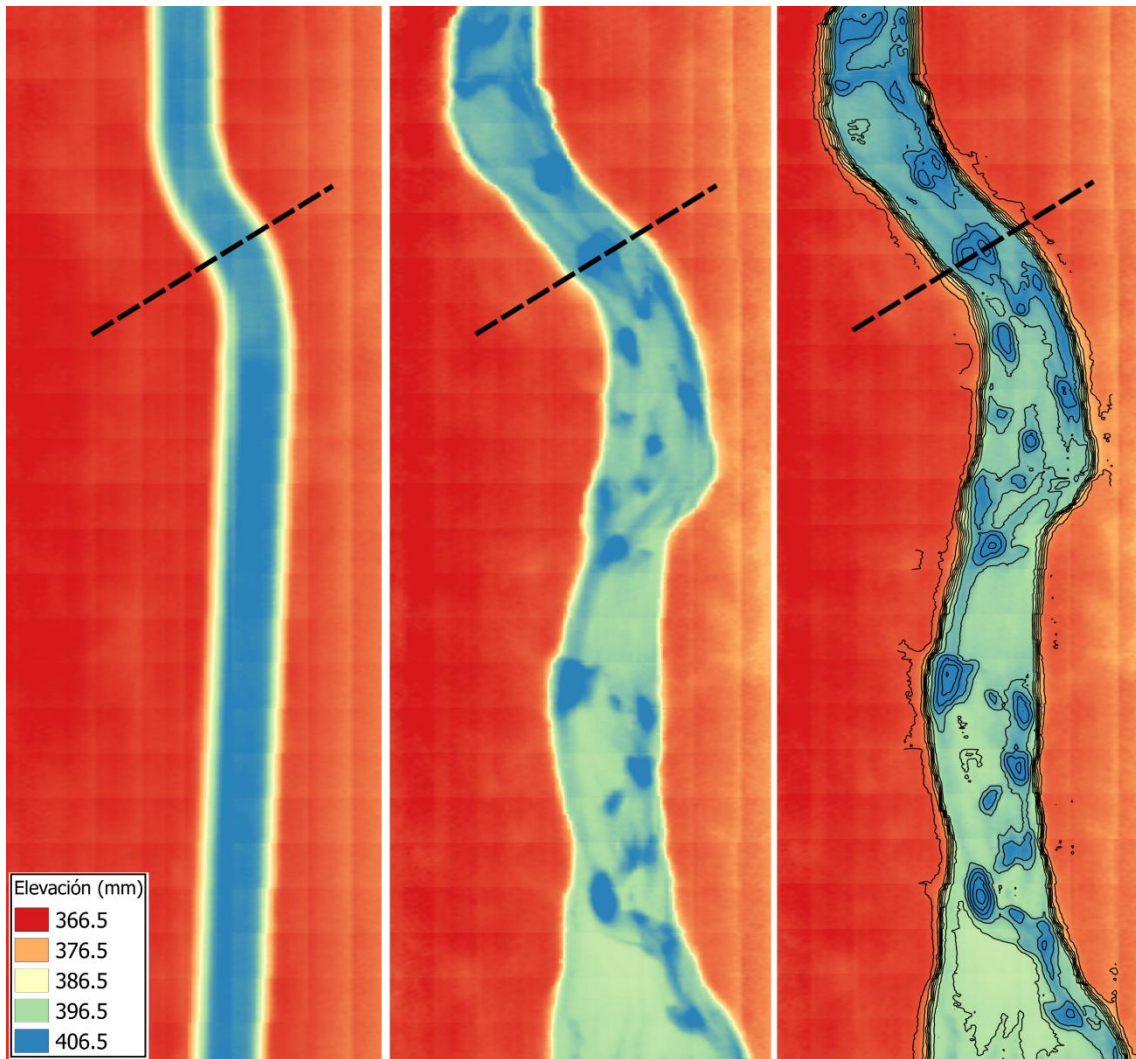


Figura 128: a la izquierda el relevamiento previo al comienzo del experimento, al centro la geometría luego de culminado el experimento y a la derecha se adicionaron las curvas de nivel. Se experimentó con la Geometría 8, una caudal de 0.11 l/s y una pendiente de 1.2 %

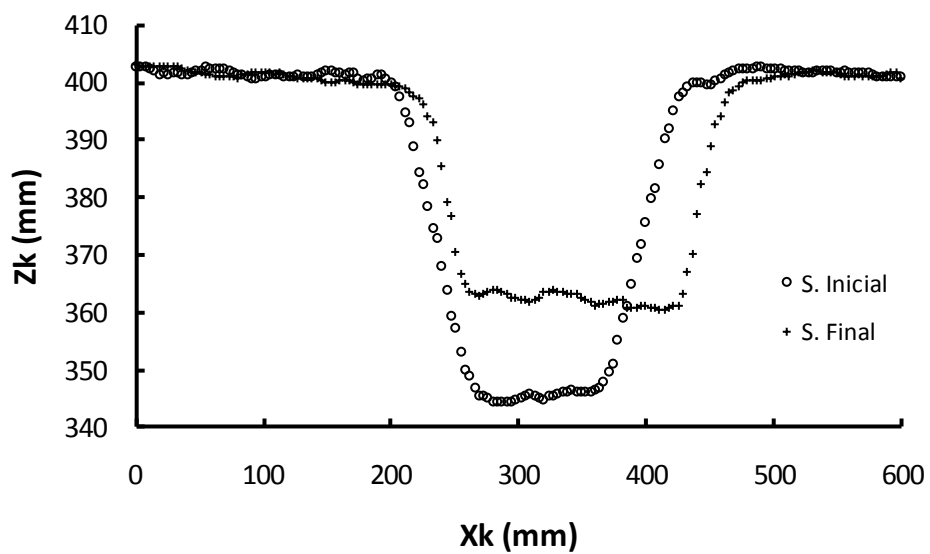


Figura 129: Los dos perfiles señalados en planta en la Figura 128.

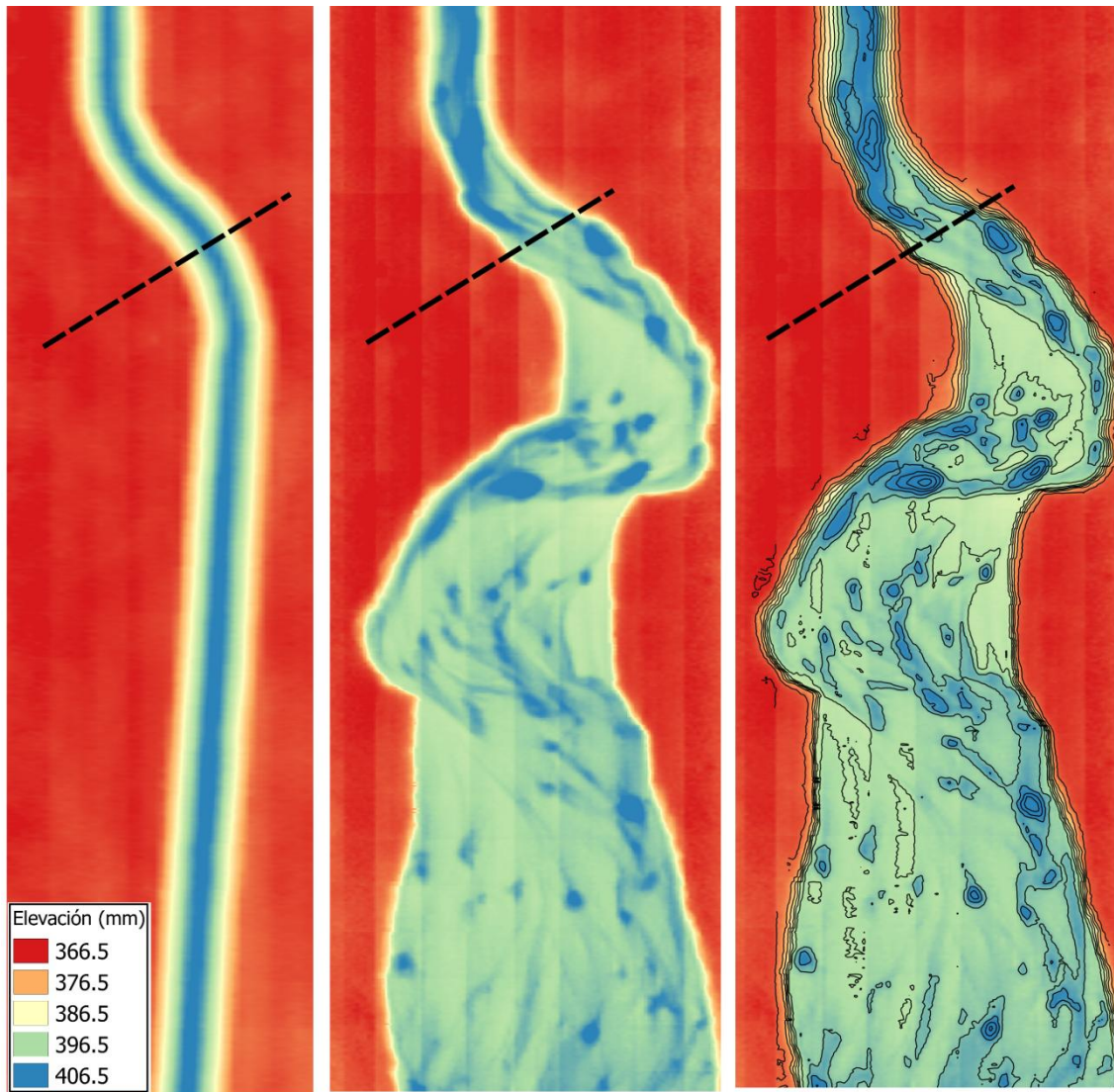


Figura 130: a la izquierda el relevamiento previo al comienzo del experimento, al centro la geometría luego de culminado el experimento y a la derecha se adicionaron las curvas de nivel. Se experimentó con la Geometría 8, una caudal de 0.16 l/s y una pendiente de 1.2 %

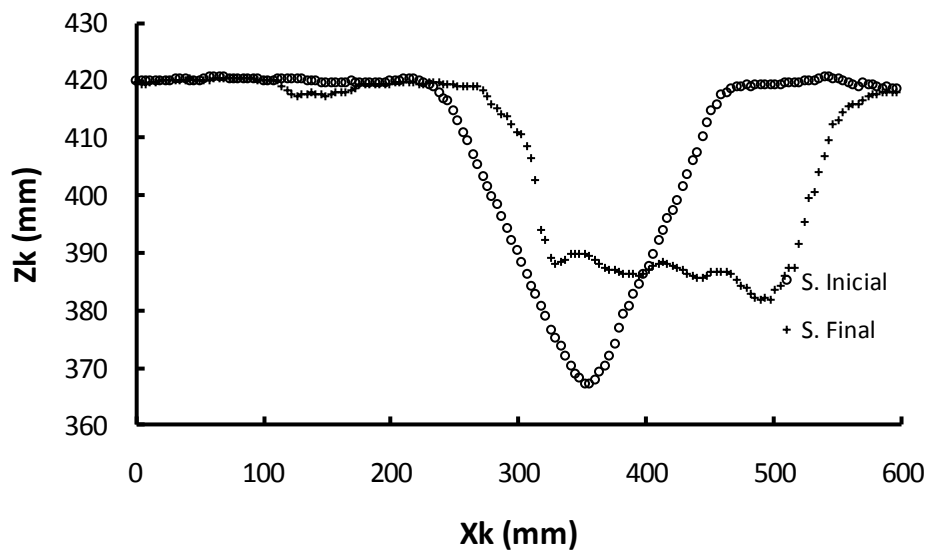


Figura 131: Los dos perfiles señalados en planta en la Figura 130.

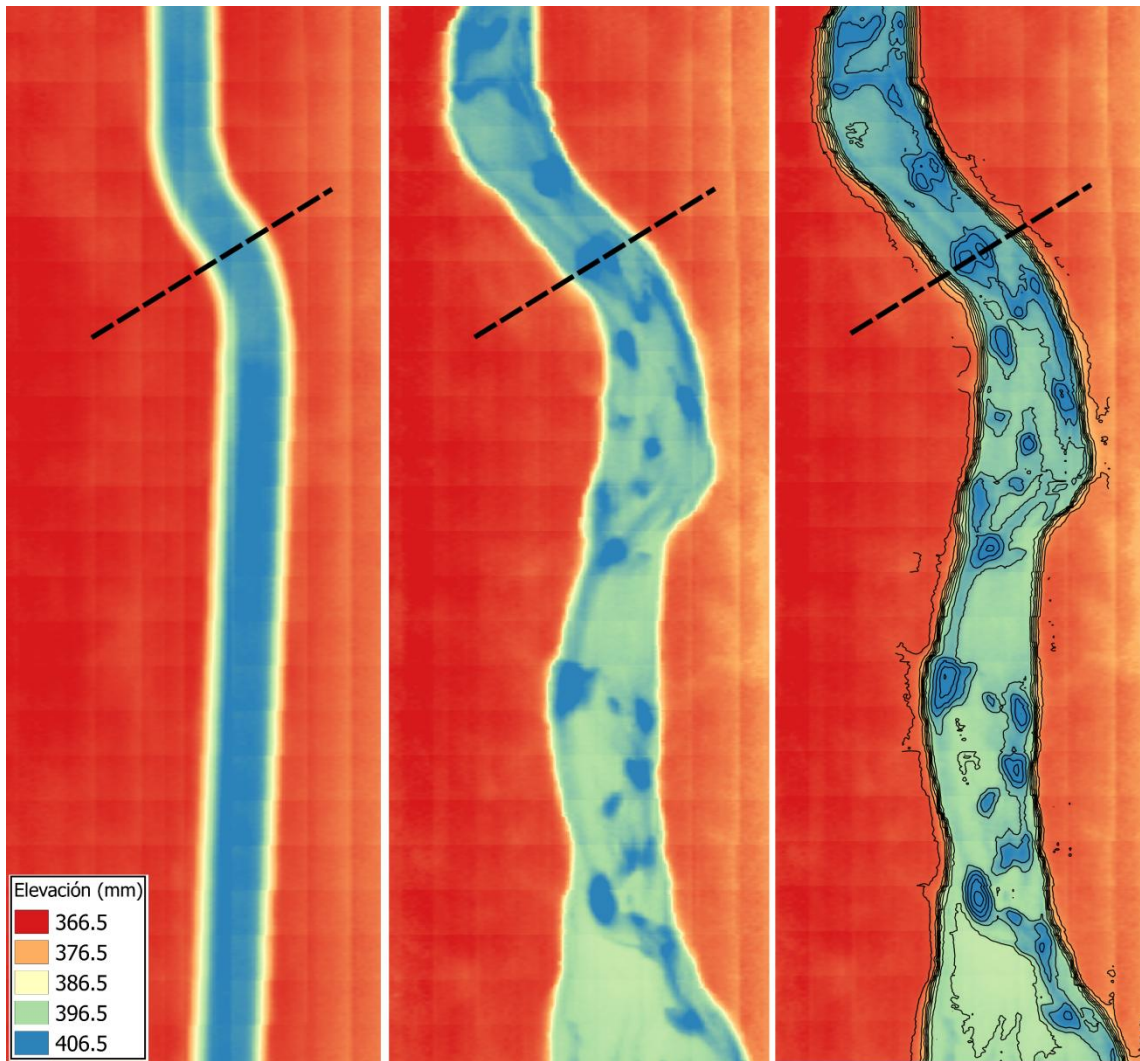


Figura 132: a la izquierda el relevamiento previo al comienzo del experimento, al centro la geometría luego de culminado el experimento y a la derecha se adicionaron las curvas de nivel. Se experimentó con la Geometría 6, una caudal de 0.12 l/s y una pendiente de 1.8 %

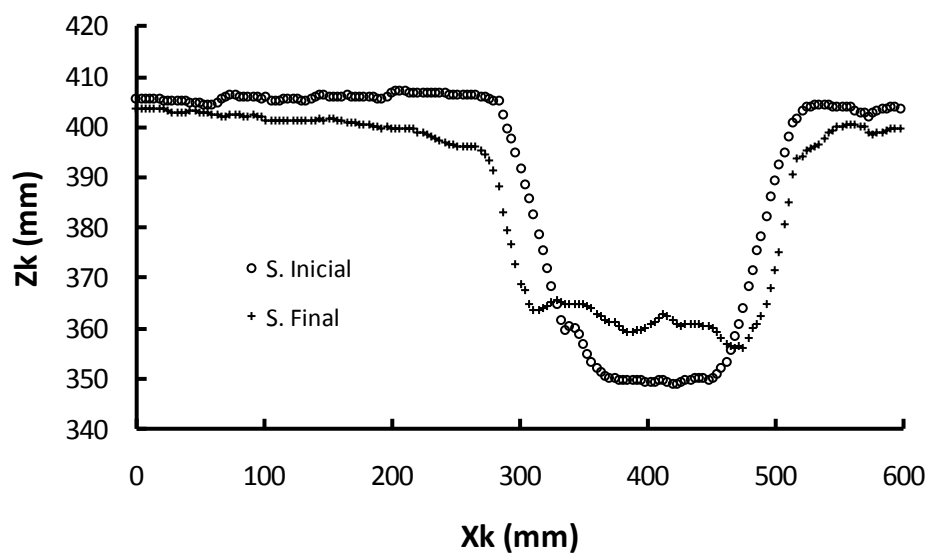


Figura 133: Los dos perfiles señalados en planta en la Figura 132.

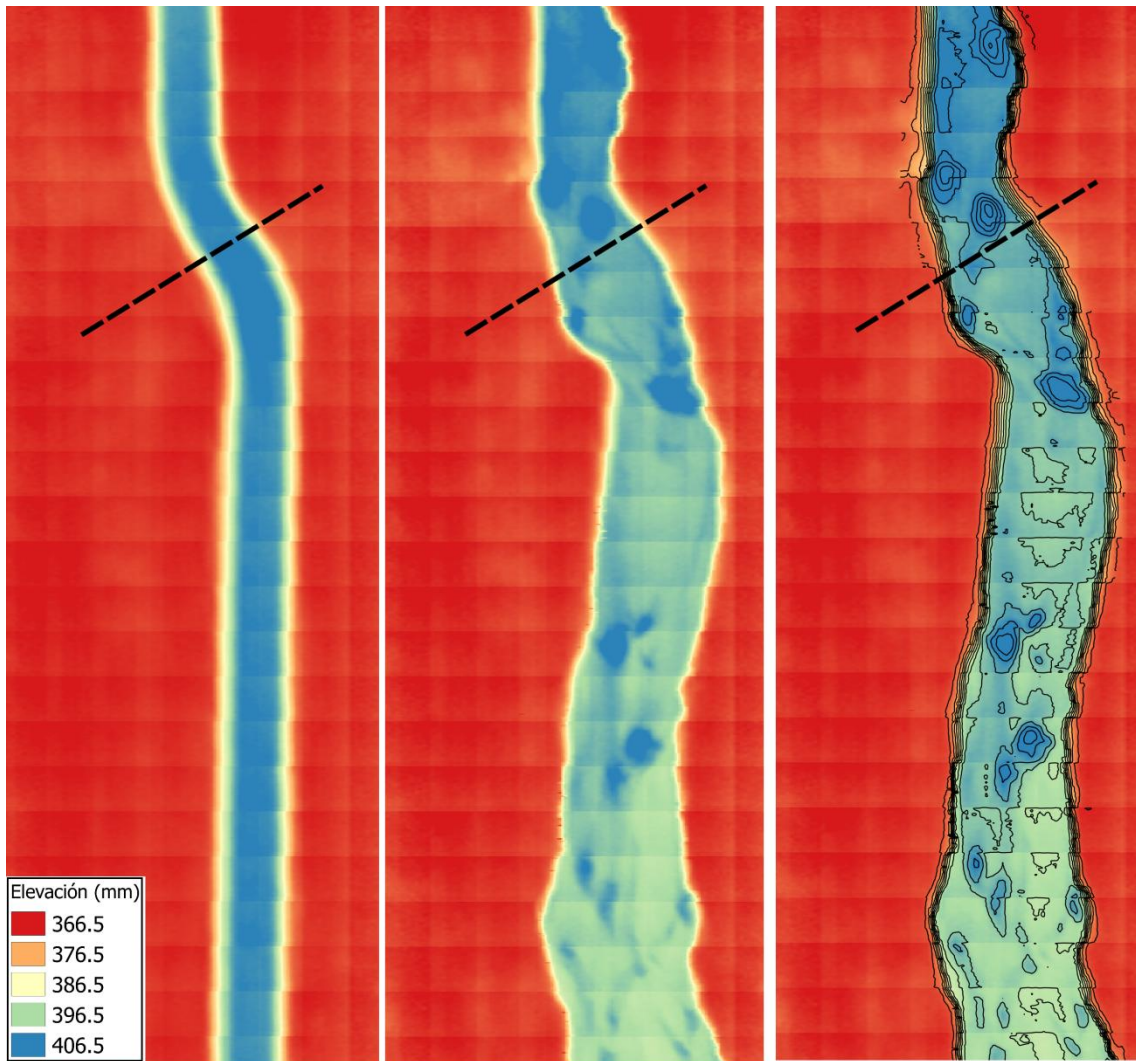


Figura 134: a la izquierda el relevamiento previo al comienzo del experimento, al centro la geometría luego de culminado el experimento y a la derecha se adicionaron las curvas de nivel. Se experimentó con la Geometría 6, una caudal de 0.08 l/s y una pendiente de 1.8 %

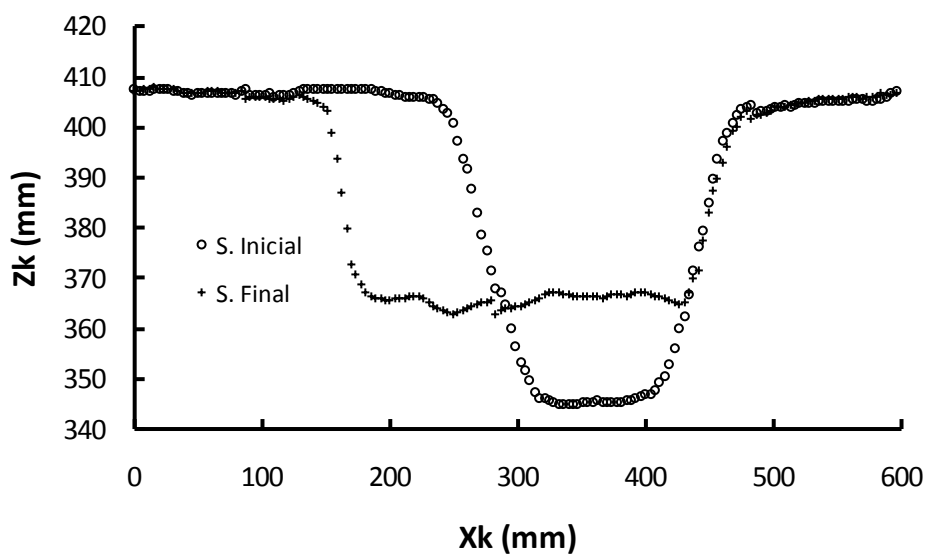


Figura 135: Los dos perfiles señalados en planta en la Figura 134.

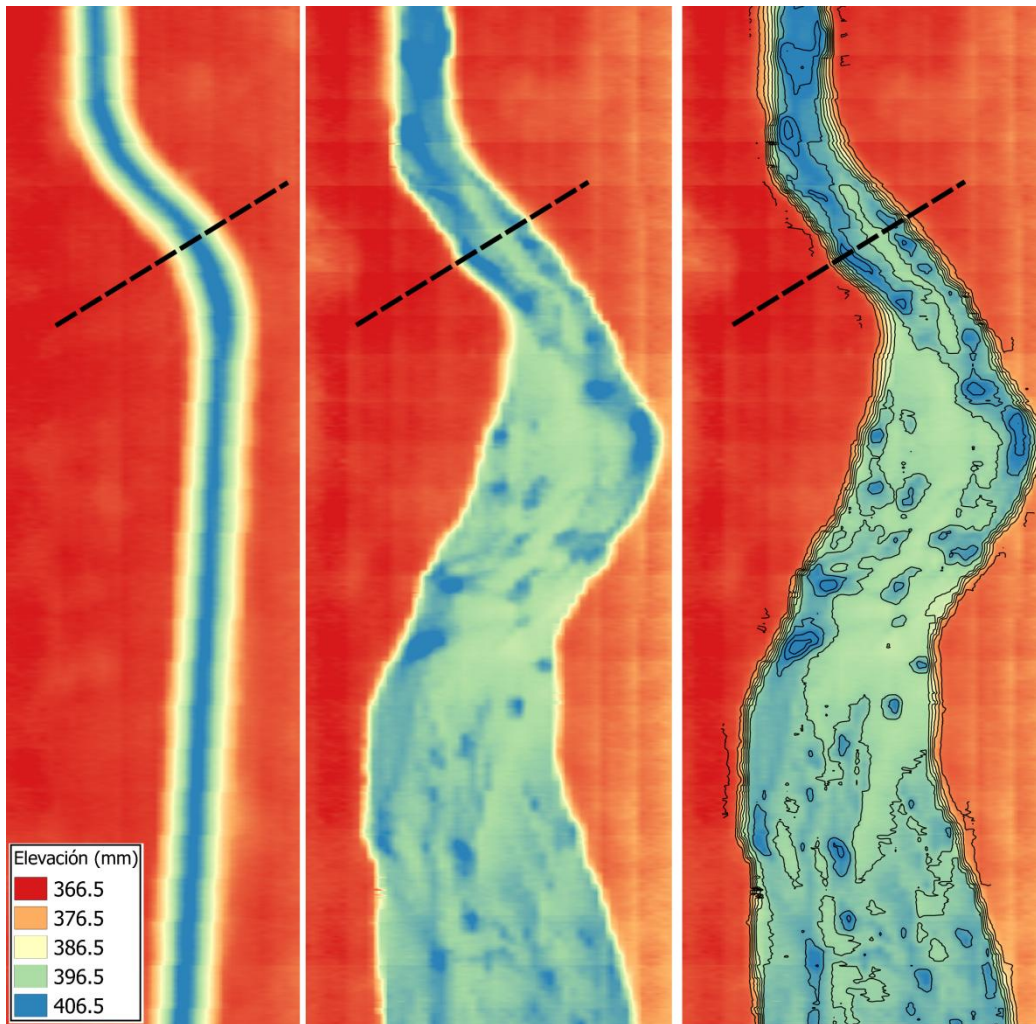


Figura 136: a la izquierda el relevamiento previo al comienzo del experimento, al centro la geometría luego de culminado el experimento y a la derecha se adicionaron las curvas de nivel. Se experimentó con la Geometría 8, una caudal de 0.13 l/s y una pendiente de 1.8 %

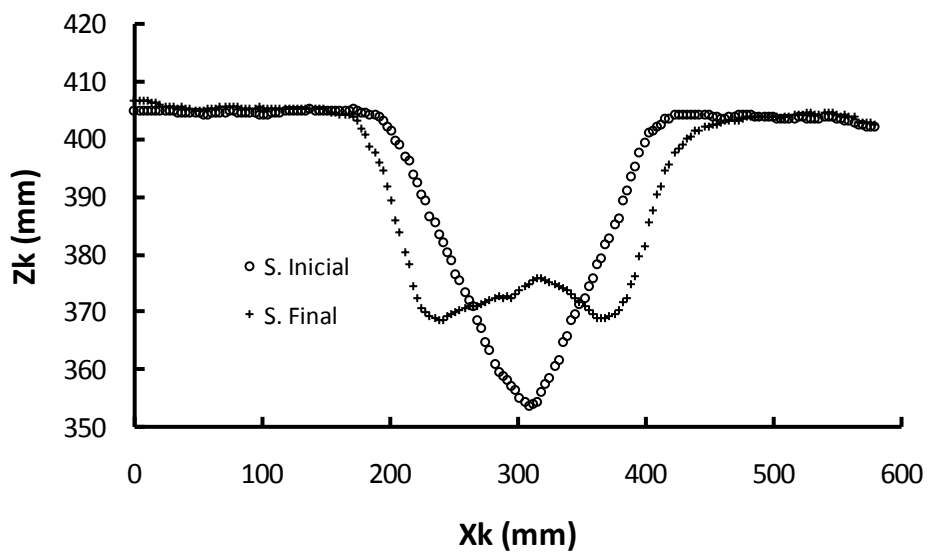


Figura 137: Los dos perfiles señalados en planta en la Figura 136.

ANEXO V

Relevamientos a tiempo real. Comparación entre las superficies relevadas previas y posteriores a la corrección.

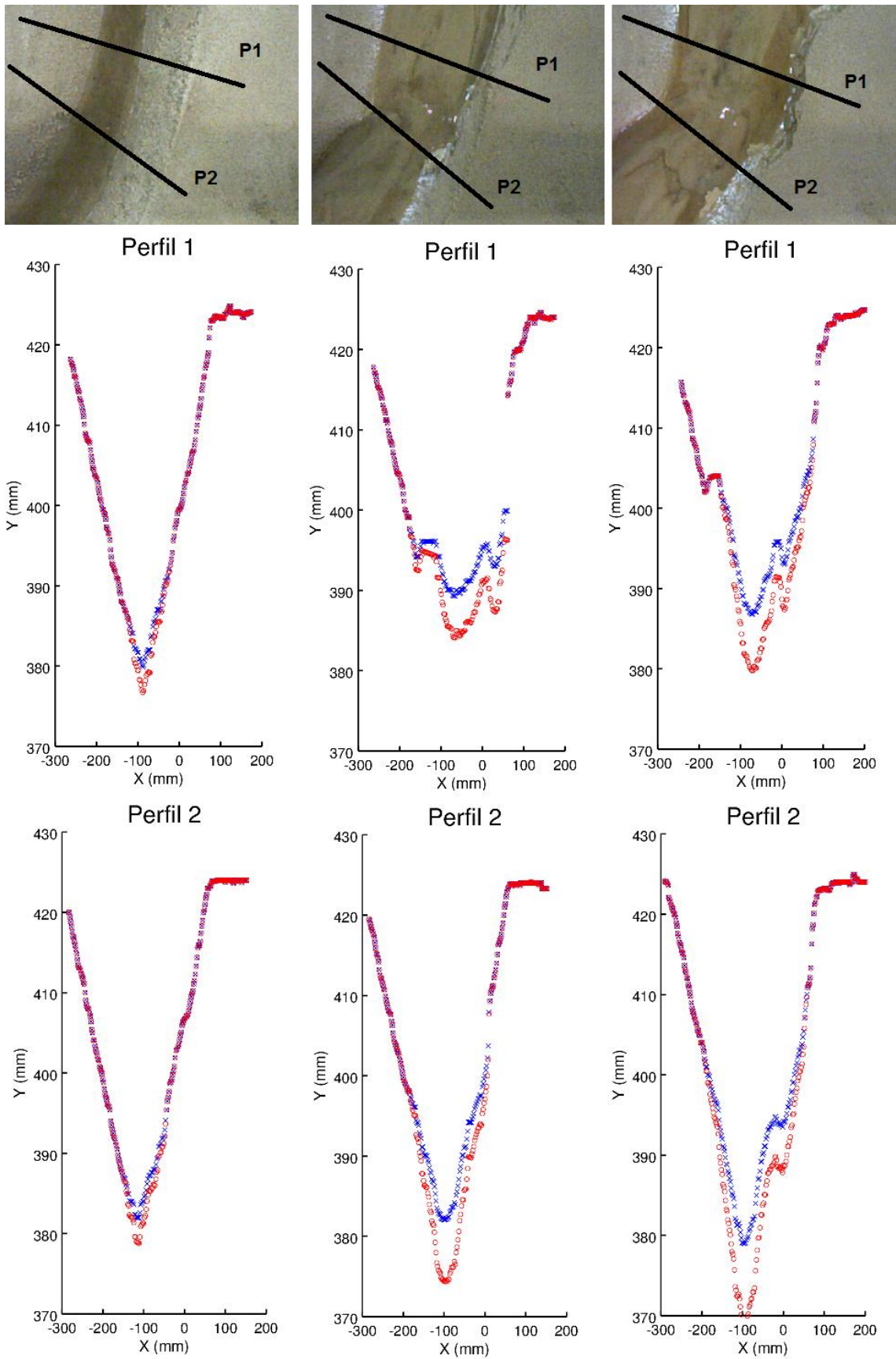


Figura 138: en la columna de la izquierda, la imagen RGB y los perfiles señalados a los 5 minutos de ensayo, en la central a las 6 hs y a la derecha a las 40 hs. En todos los casos los puntos azules son sin corregir y los rojos corregidos. El experimento corresponde a la Geometría 6, con un caudal de 0.16 l/s y una pendiente de 0.6%.

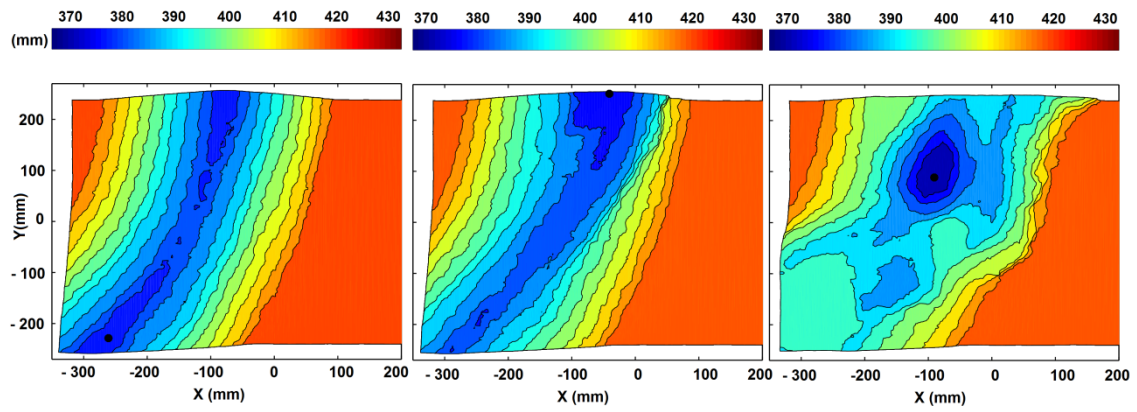


Figura 139: curvas hipsométricas de la sección relevada, a la izquierda a los 5 minutos de ensayo, en el centro a las 6 hs y a la derecha a las 40 hs. El experimento corresponde a la Geometría 6, con un caudal de 0.16 l/s y una pendiente de 0.6%.

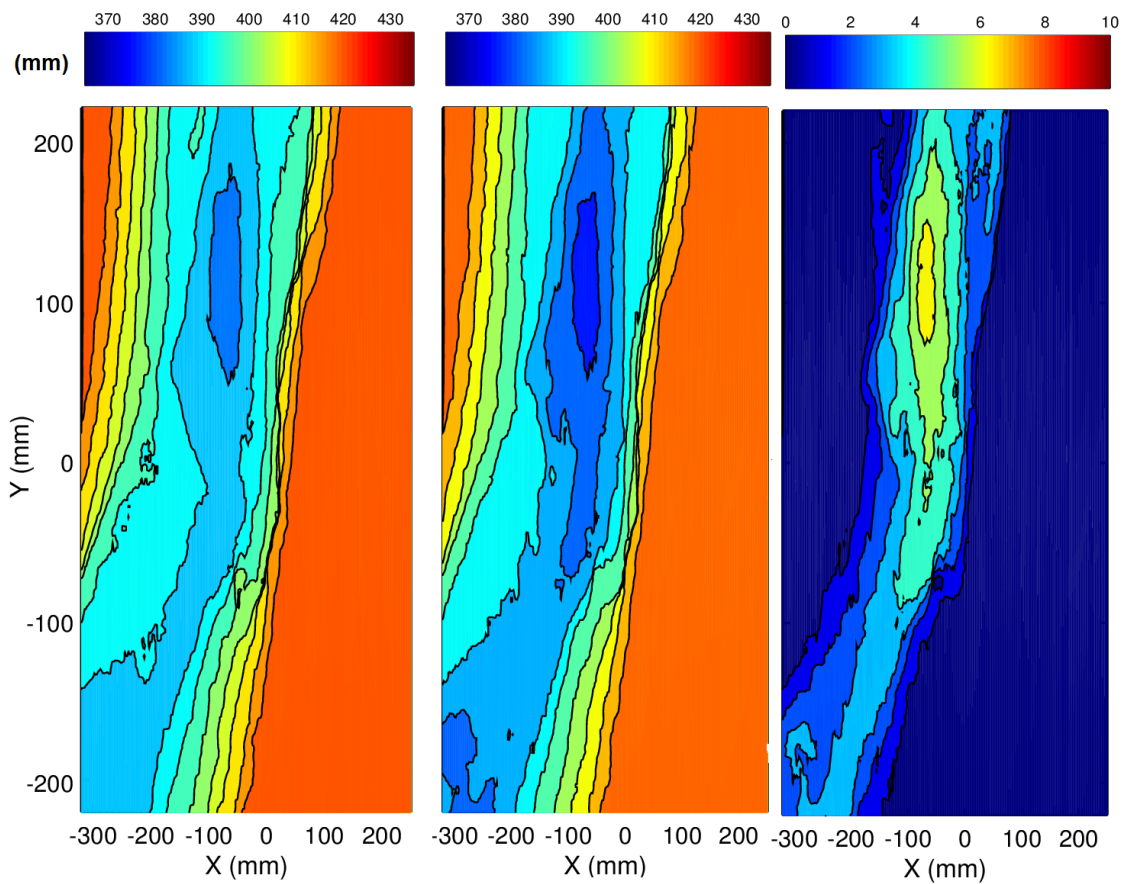


Figura 140.- isolneas de la superficie relevada a las 6 hs de ensayo, a la izquierda las correspondientes a las mediciones sin corregir, al centro las corregidas y a la derecha las isolneas de las correcciones realizadas. El experimento corresponde a la Geometría 6, con un caudal de 0.16 l/s y una pendiente de 0.6%.

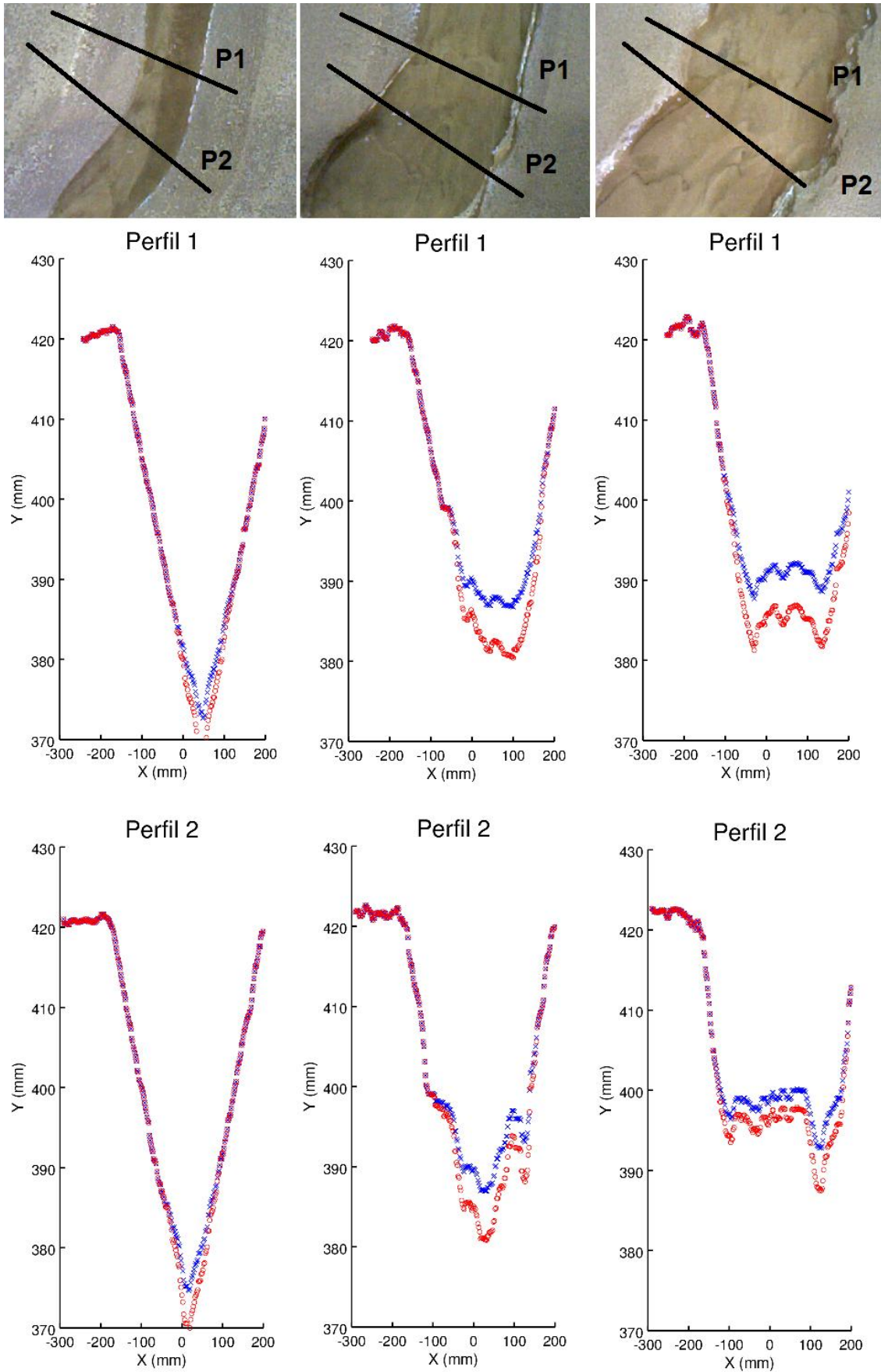


Figura 141: en la columna de la izquierda, la imagen RGB y los perfiles señalados a los 5 minutos de ensayo, en la central a las 6 hs y a la derecha a las 40 hs. En todos los casos los puntos azules son sin corregir y los rojos corregidos. El experimento corresponde a la Geometría 6, con un caudal de 0.20 l/s y una pendiente de 0.6%.

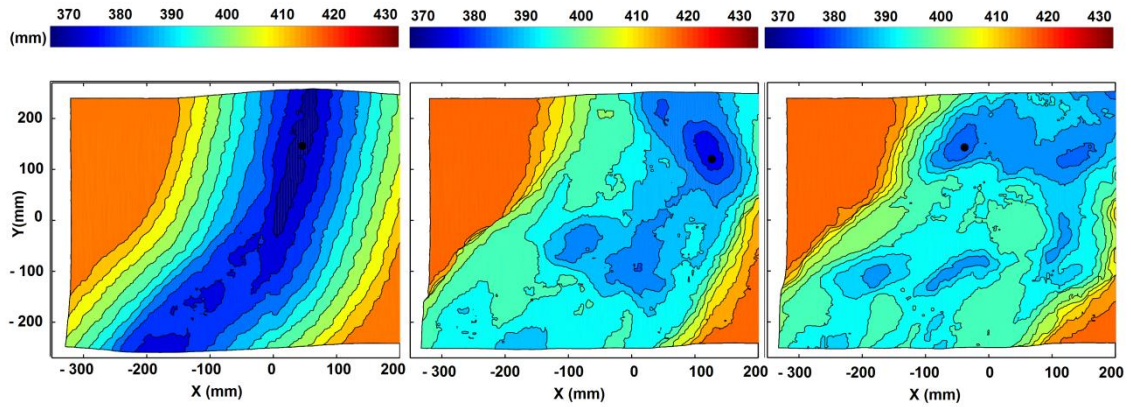


Figura 142: curvas hipsométricas de la sección relevada, a la izquierda a los 5 minutos de ensayo, en el centro a las 6 hs y a la derecha a las 40 hs. El experimento corresponde a la Geometría 6, con un caudal de 0.20 l/s y una pendiente de 0.6%.

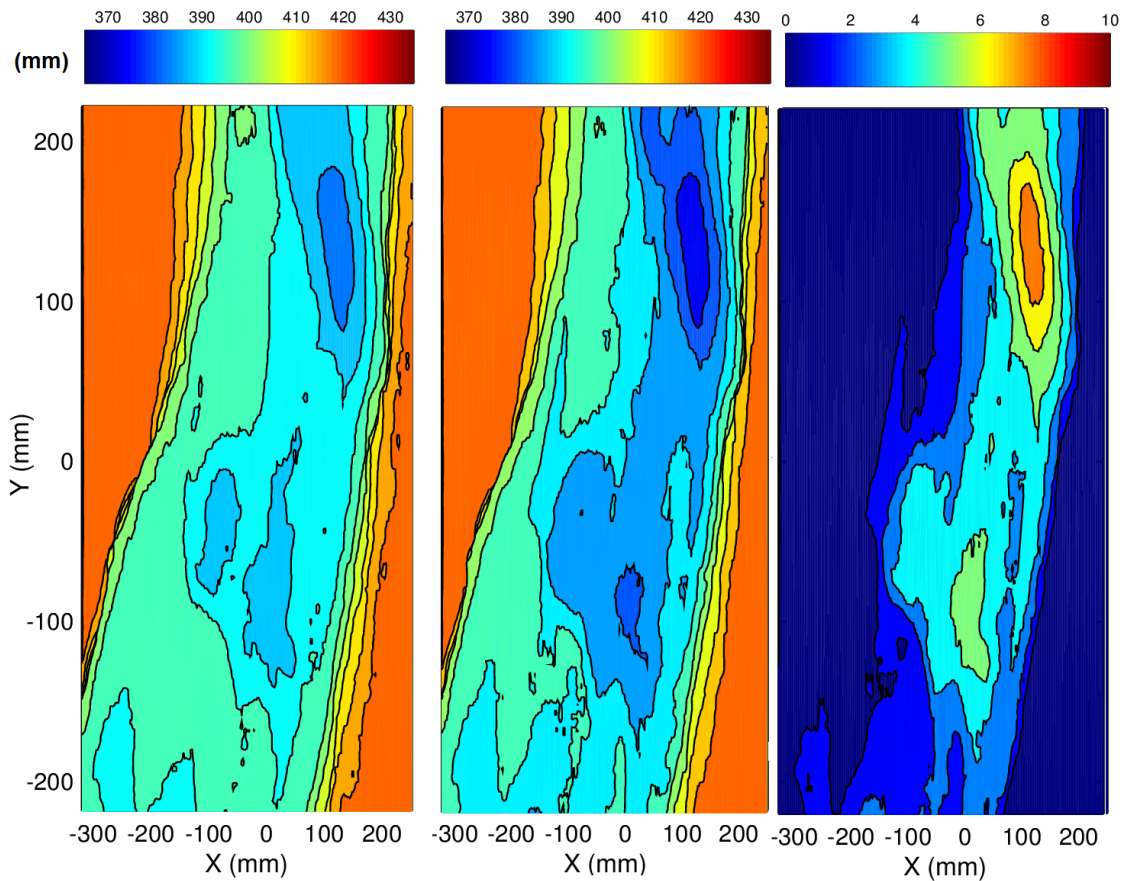


Figura 143: isolneas de la superficie relevada a las 6 hs de ensayo, a la izquierda las correspondientes a las mediciones sin corregir, al centro las corregidas y a la derecha las isolneas de las correcciones realizadas. El experimento corresponde a la Geometría 6, con un caudal de 0.20 l/s y una pendiente de 0.6%.

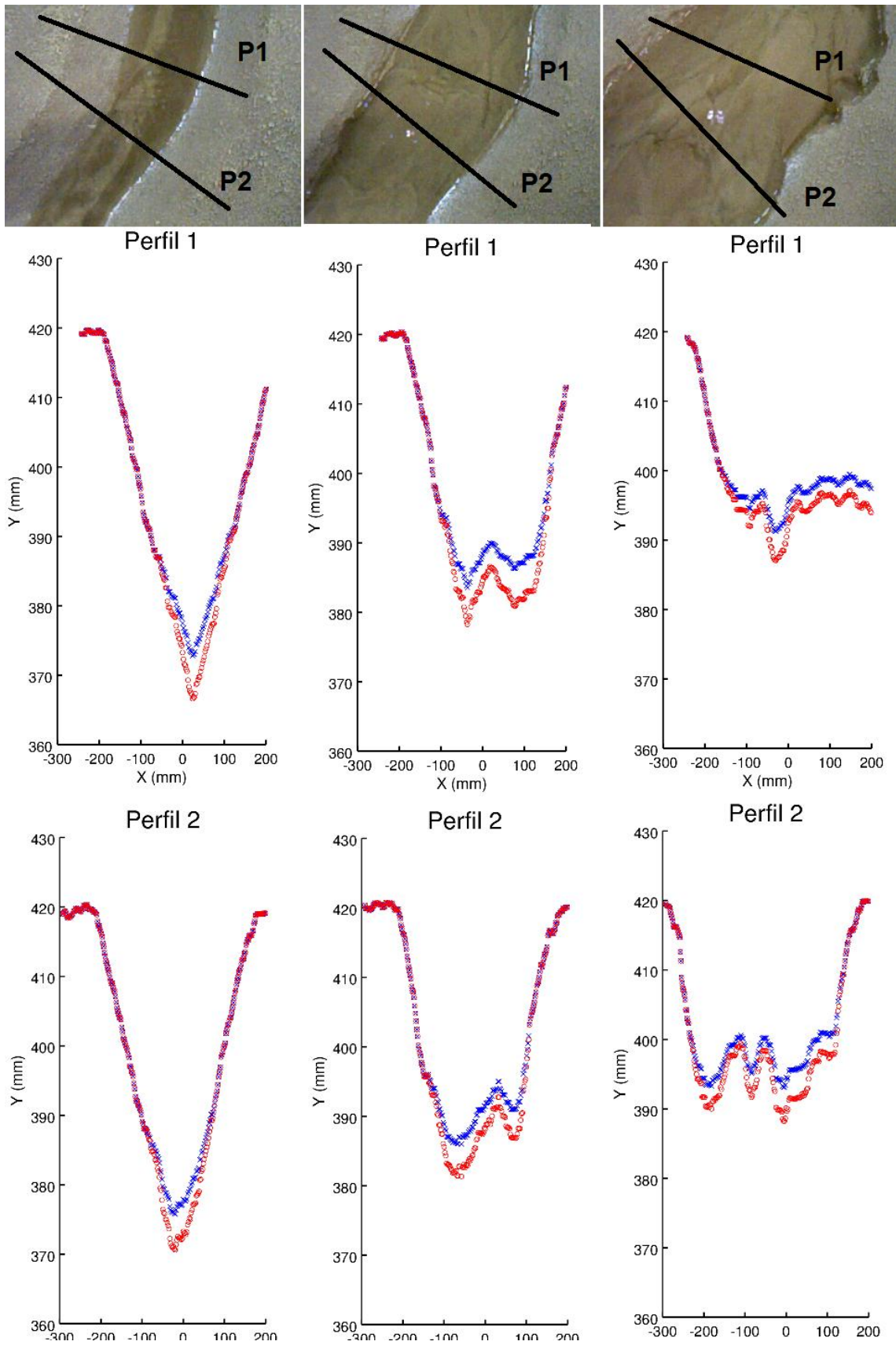


Figura 144: en la columna de la izquierda, la imagen RGB y los perfiles señalados a los 5 minutos de ensayo, en la central a las 6 hs y a la derecha a las 40 hs. En todos los casos los puntos azules son sin corregir y los rojos corregidos. El experimento corresponde a la Geometría 6, con un caudal de 0.25 l/s y una pendiente de 0.6%.

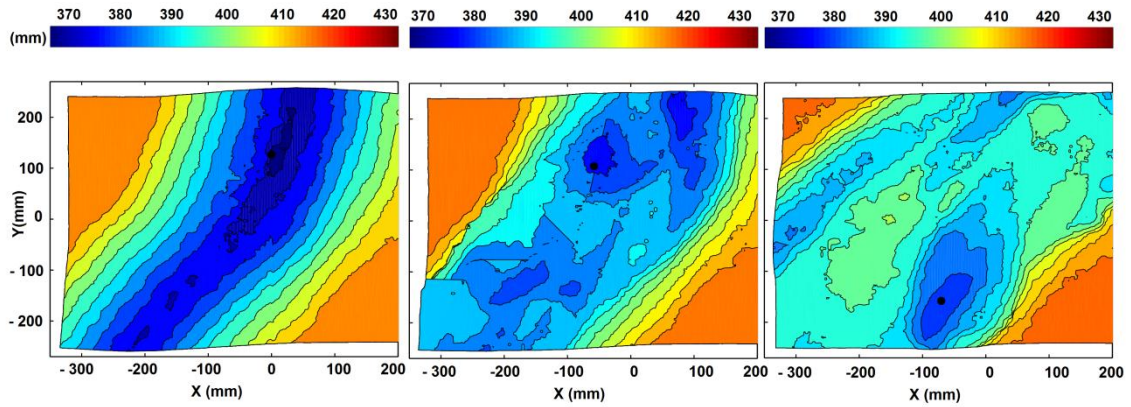


Figura 145: curvas hipsométricas de la sección relevada, a la izquierda a los 5 minutos de ensayo, en el centro a las 6 hs y a la derecha a las 40 hs. El experimento corresponde a la Geometría 6, con un caudal de 0.25 l/s y una pendiente de 0.6%.

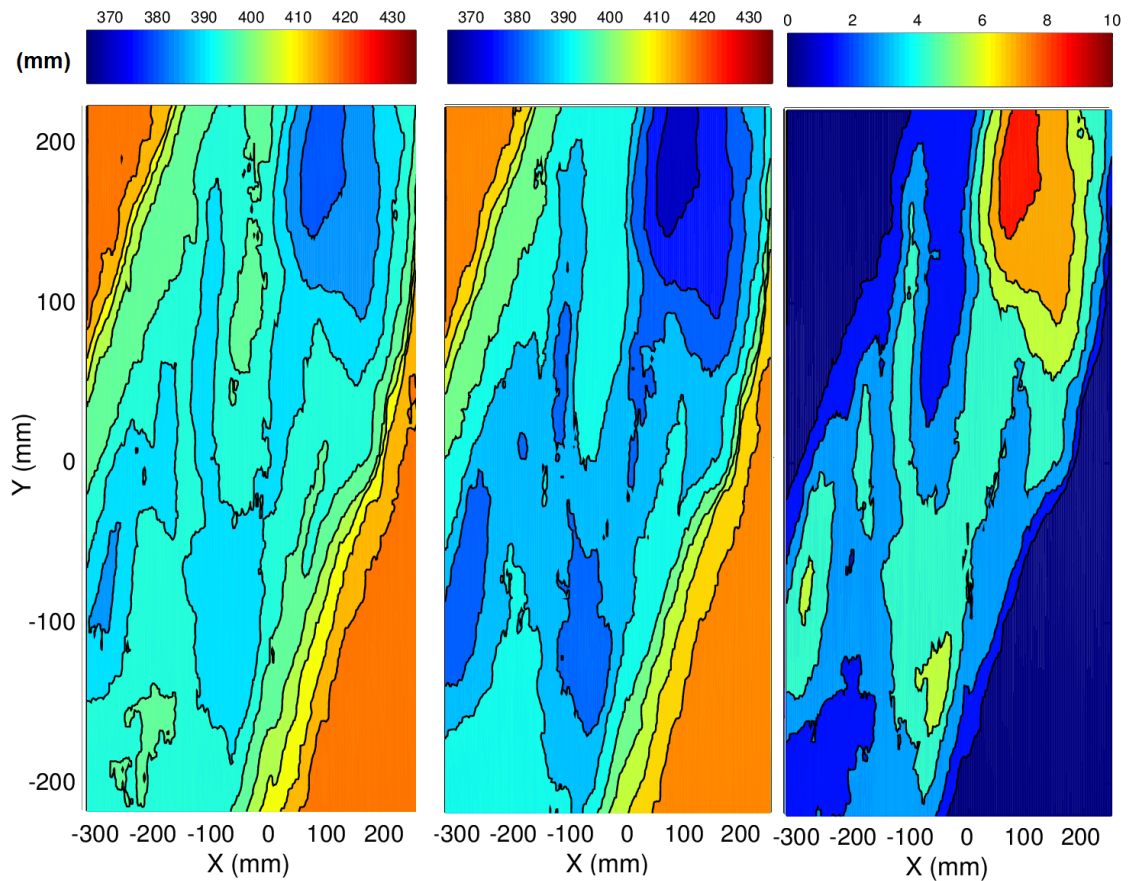


Figura 146: isolneas de la superficie relevada a las 6 hs de ensayo, a la izquierda las correspondientes a las mediciones sin corregir, al centro las corregidas y a la derecha las isolneas de las correcciones realizadas. El experimento corresponde a la Geometría 6, con un caudal de 0.25 l/s y una pendiente de 0.6%.

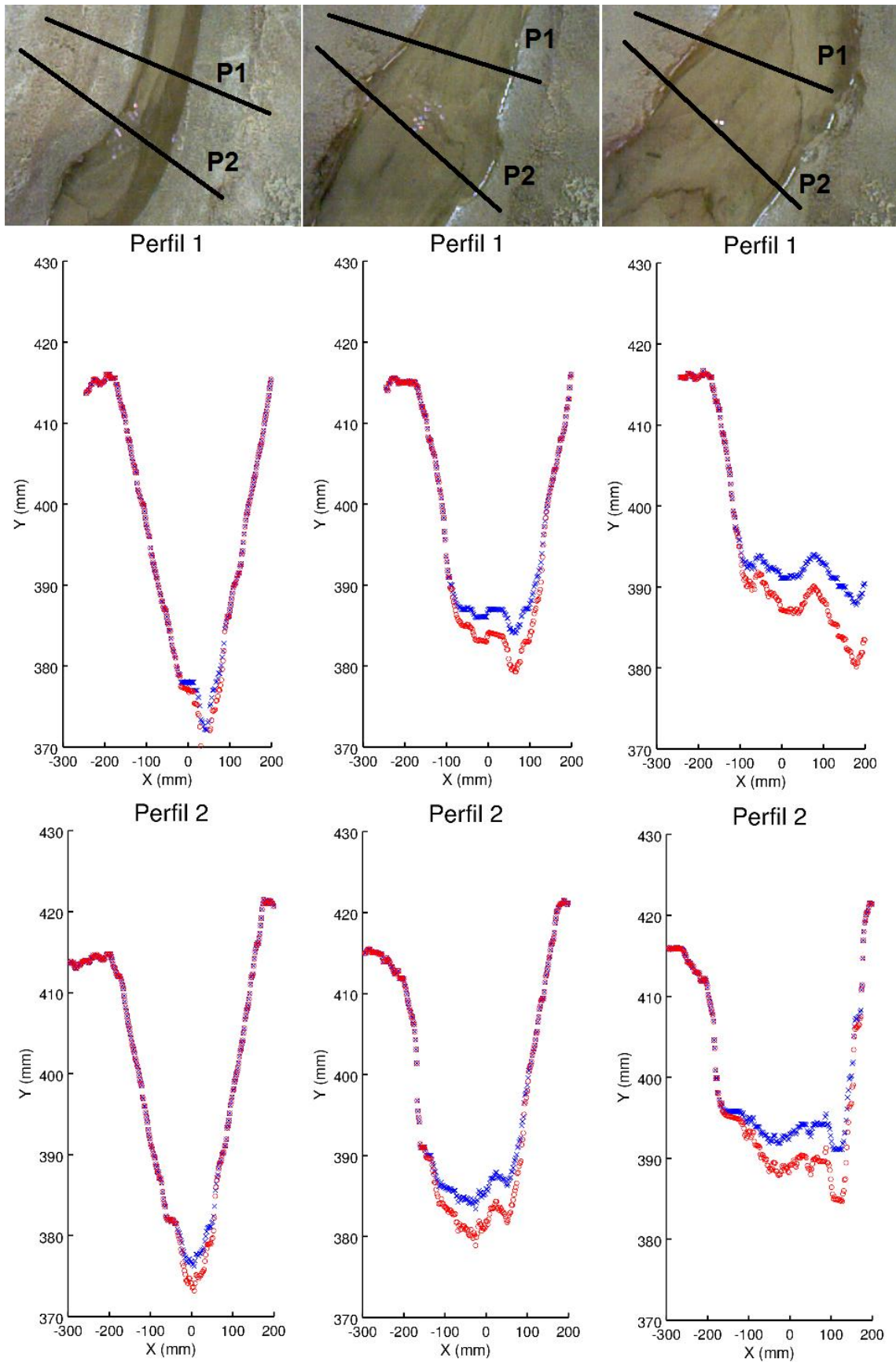


Figura 147: en la columna de la izquierda, la imagen RGB y los perfiles señalados a los 5 minutos de ensayo, en la central a las 6 hs y a la derecha a las 40 hs. En todos los casos los puntos azules son sin corregir y los rojos corregidos. El experimento corresponde a la Geometría 6, con un caudal de 0.15l/s y una pendiente de 0.9%.

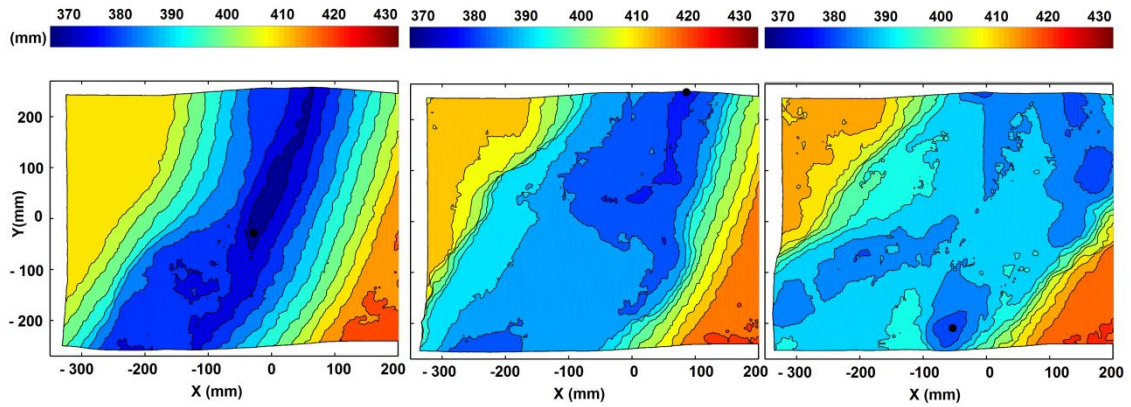


Figura 148: curvas hipsométricas de la sección relevada, a la izquierda a los 5 minutos de ensayo, en el centro a las 6 hs y a la derecha a las 40 hs. El experimento corresponde a la Geometría 6, con un caudal de 0.15 l/s y una pendiente de 0.9%.

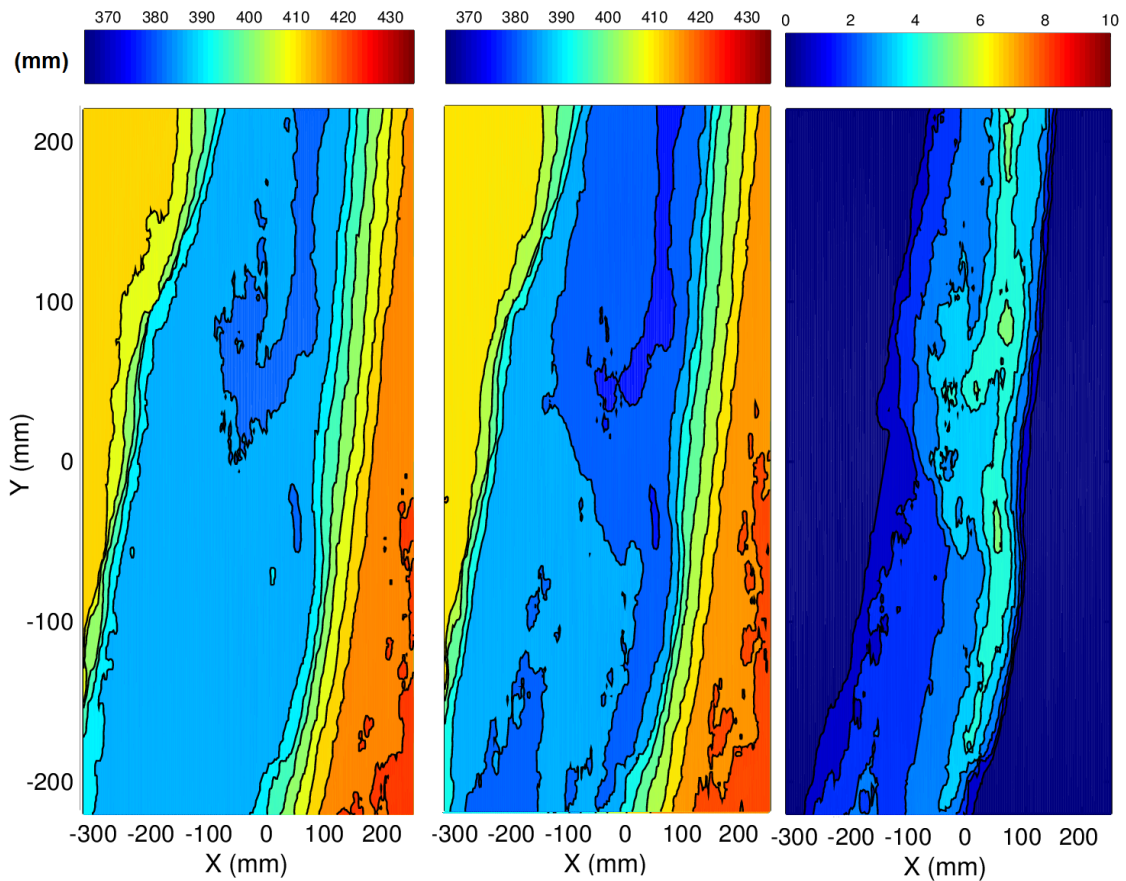


Figura 149: isolneas de la superficie relevada a las 6 hs de ensayo, a la izquierda las correspondientes a las mediciones sin corregir, al centro las corregidas y a la derecha las correcciones realizadas. El experimento corresponde a la Geometría 6, con un caudal de 0.15 l/s y una pendiente de 0.9%.

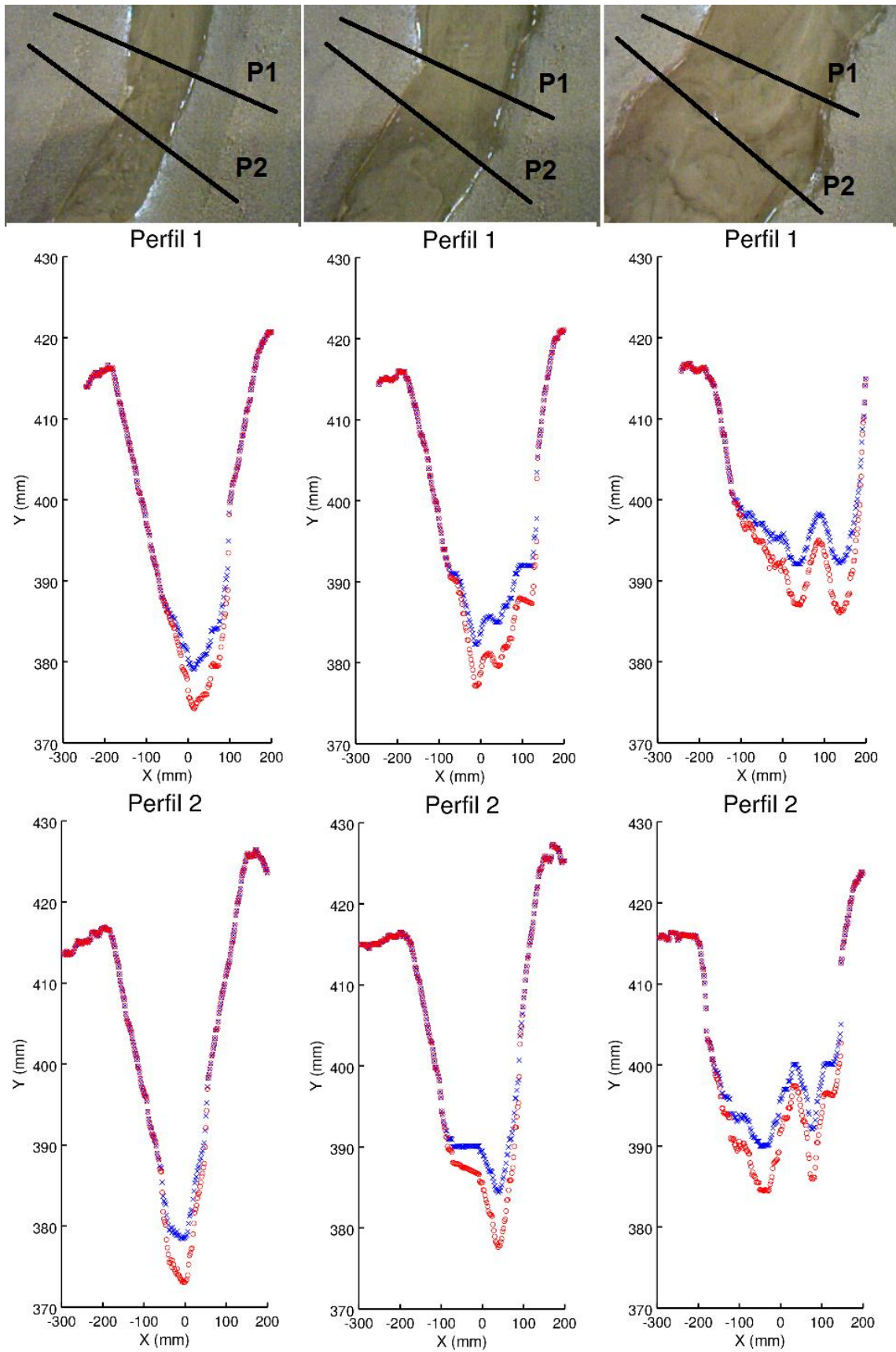


Figura 150: en la columna de la izquierda, la imagen RGB y los perfiles señalados a los 5 minutos de ensayo, en la central a las 6 hs y a la derecha a las 40 hs. En todos los casos los puntos azules son sin corregir y los rojos corregidos. El experimento corresponde a la Geometría 6, con un caudal de 0.20l/s y una pendiente de 0.9%.

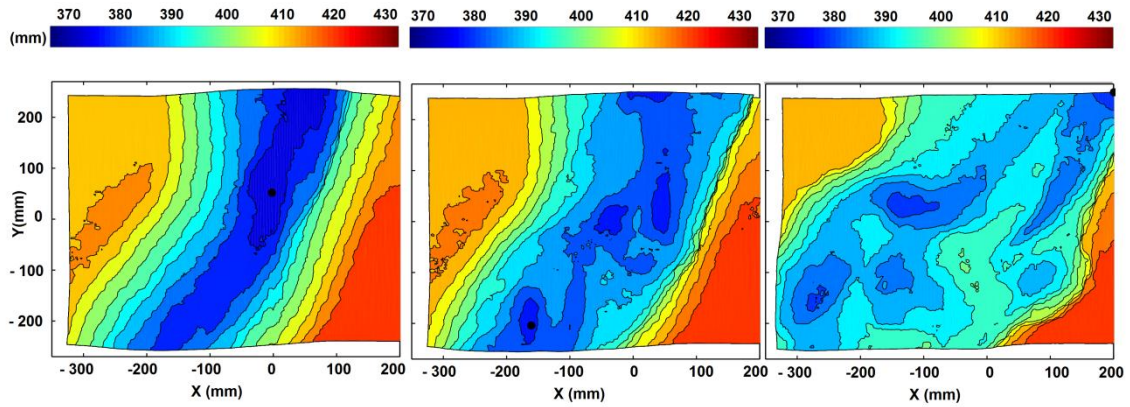


Figura 151: curvas hipsométricas de la sección relevada, a la izquierda a los 5 minutos de ensayo, en el centro a las 6 hs y a la derecha a las 40 hs. El experimento corresponde a la Geometría 6, con un caudal de 0.20 l/s y una pendiente de 0.9%.

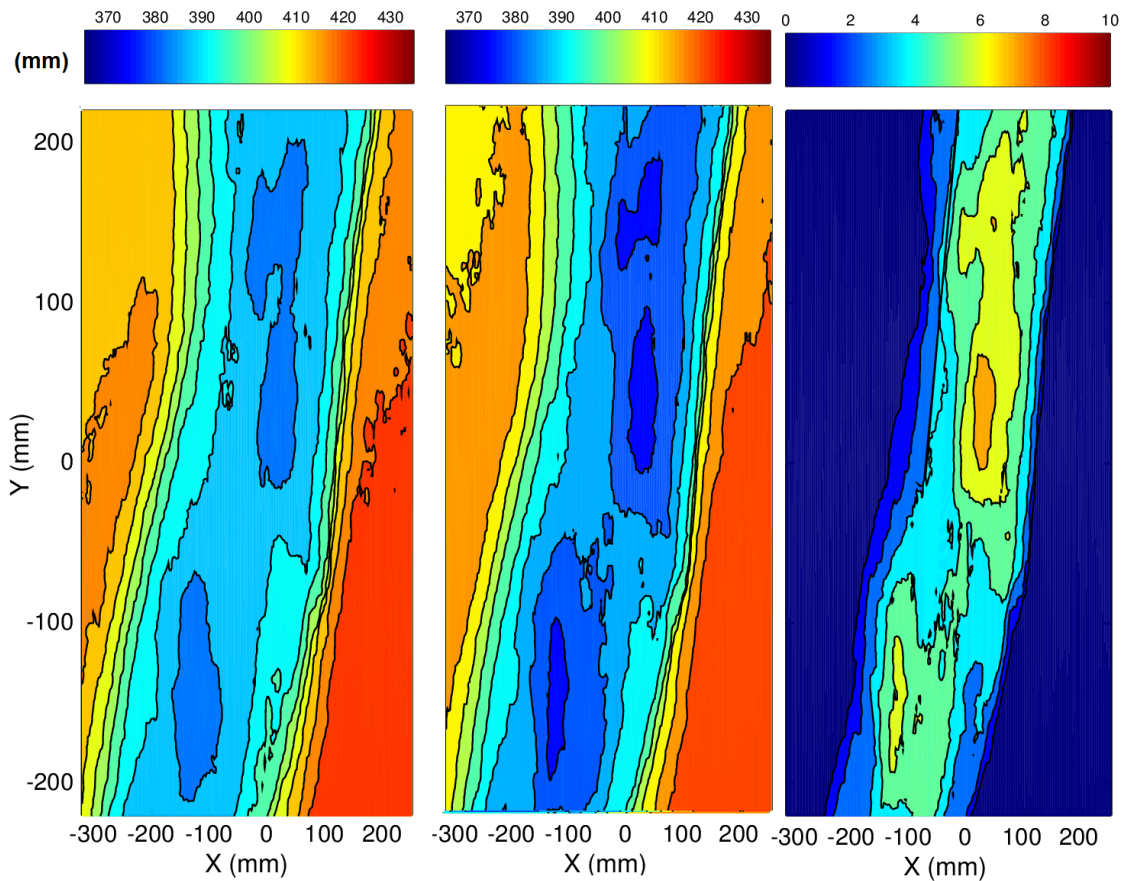


Figura 152: isolneas de la superficie relevada a las 6 hs de ensayo, a la izquierda las correspondientes a las mediciones sin corregir, al centro las corregidas y a la derecha las isolneas de las correcciones realizadas. El experimento corresponde a la Geometría 6, con un caudal de 0.20 l/s y una pendiente de 0.9%.

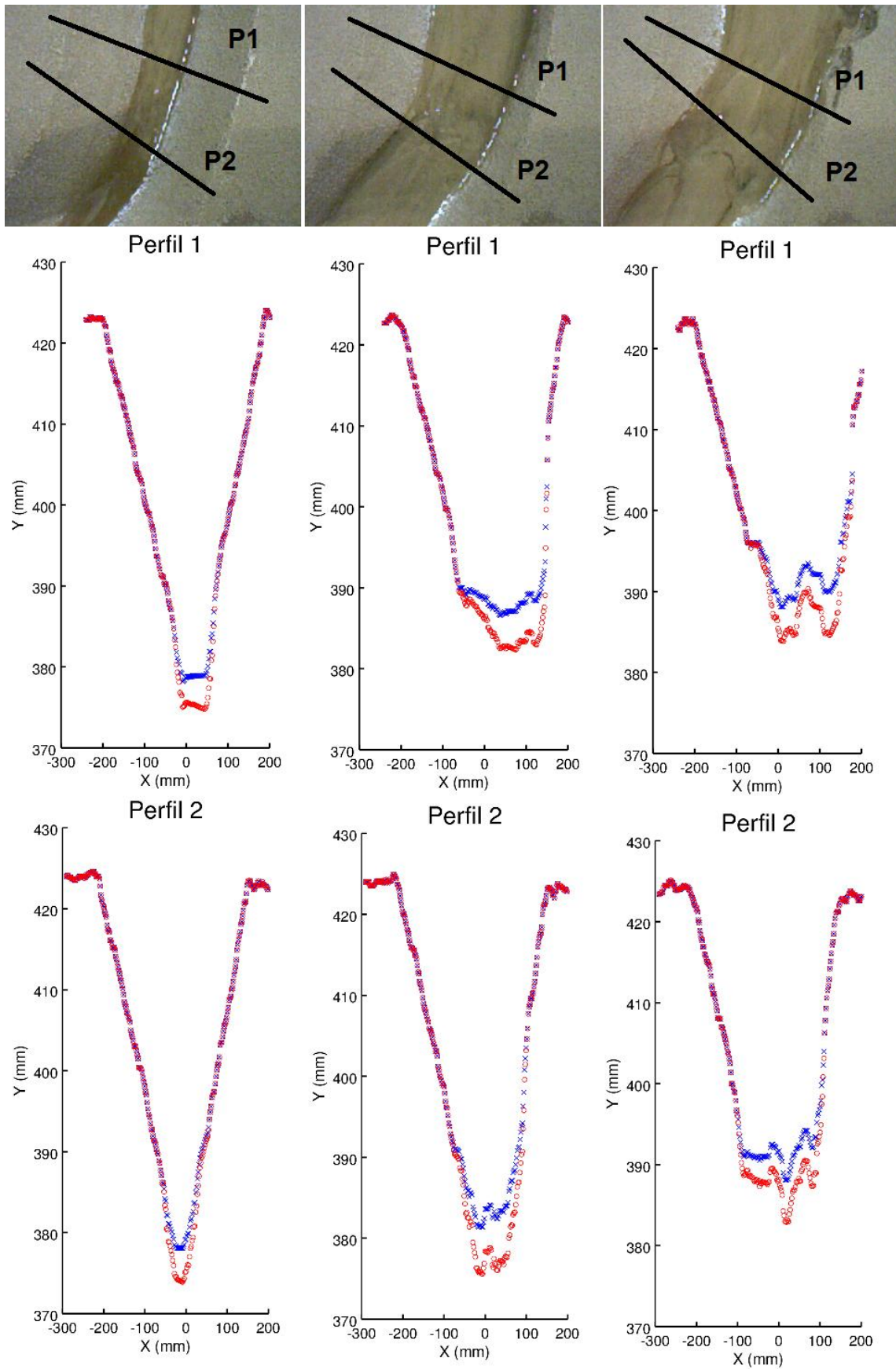


Figura 153: en la columna de la izquierda, la imagen RGB y los perfiles señalados a los 5 minutos de ensayo, en la central a las 6 hs y a la derecha a las 40 hs. En todos los casos los puntos azules son sin corregir y los rojos corregidos. El experimento corresponde a la Geometría 6, con un caudal de 0.08l/s y una pendiente de 1.2%.

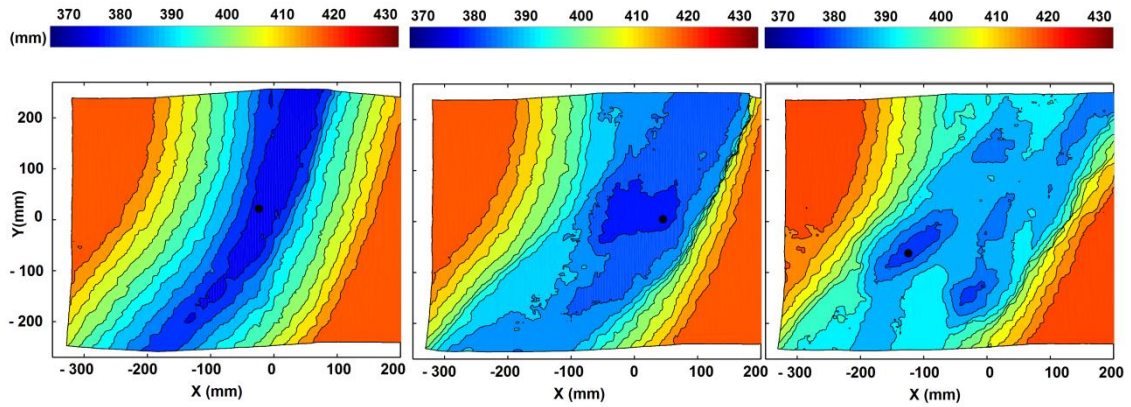


Figura 154: curvas hipsométricas de la sección relevada, a la izquierda a los 5 minutos de ensayo, en el centro a las 6 hs y a la derecha a las 40 hs. El experimento corresponde a la Geometría 6, con un caudal de 0.08 l/s y una pendiente de 1.2%.

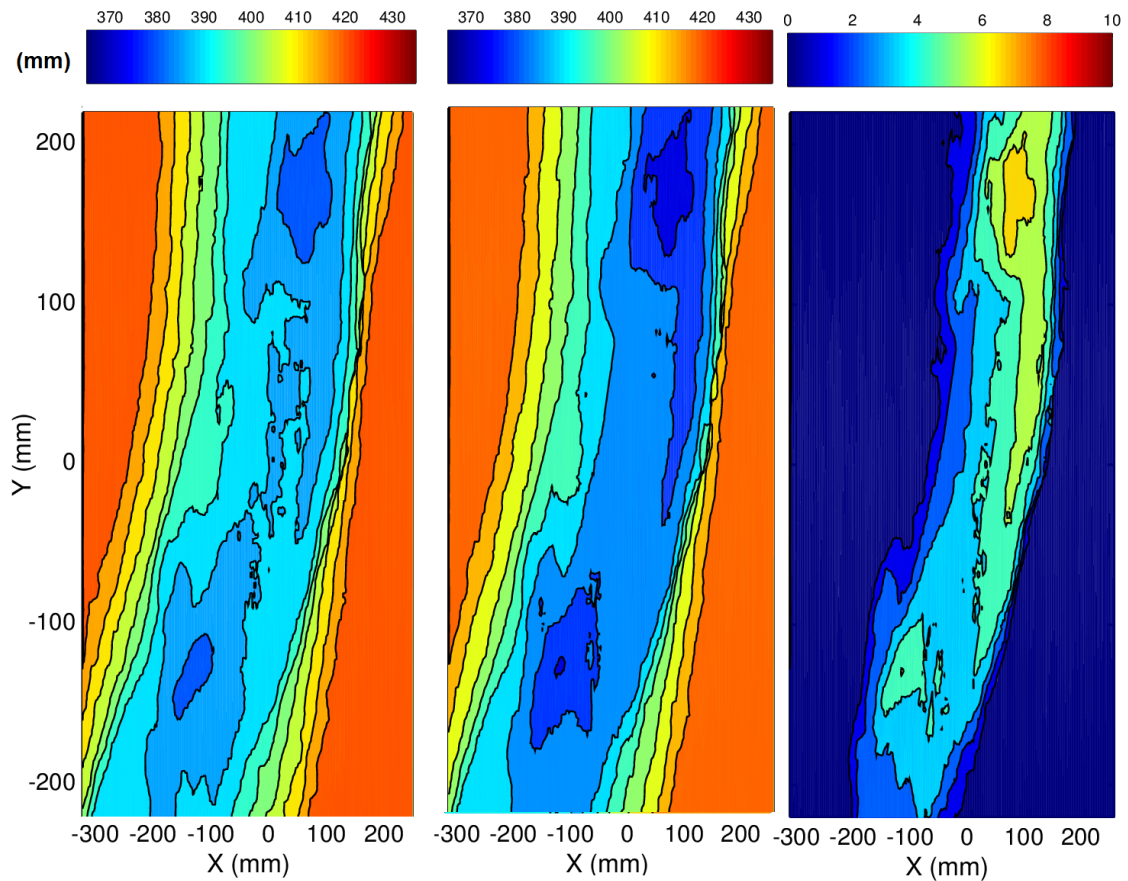


Figura 155: isolneas de la superficie relevada a las 6 hs de ensayo, a la izquierda las correspondientes a las mediciones sin corregir, al centro las corregidas y a la derecha las isolneas de las correcciones realizadas. El experimento corresponde a la Geometría 6, con un caudal de 0.08 l/s y una pendiente de 1.2%.

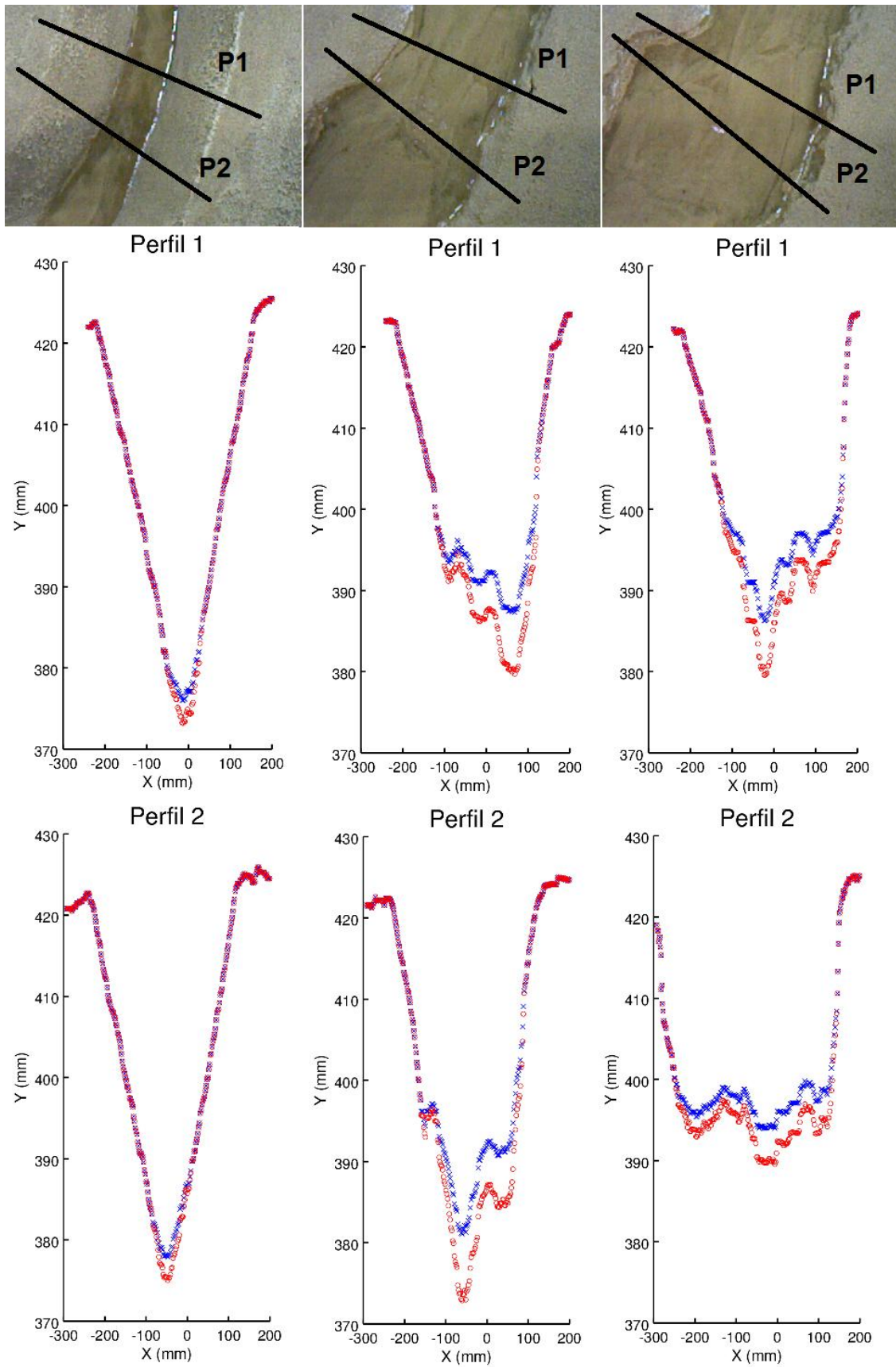


Figura 156: en la columna de la izquierda, la imagen RGB y los perfiles señalados a los 5 minutos de ensayo, en la central a las 6 hs y a la derecha a las 40 hs. En todos los casos los puntos azules son sin corregir y los rojos corregidos. El experimento corresponde a la Geometría 6, con un caudal de 0.16l/s y una pendiente de 1.2%.

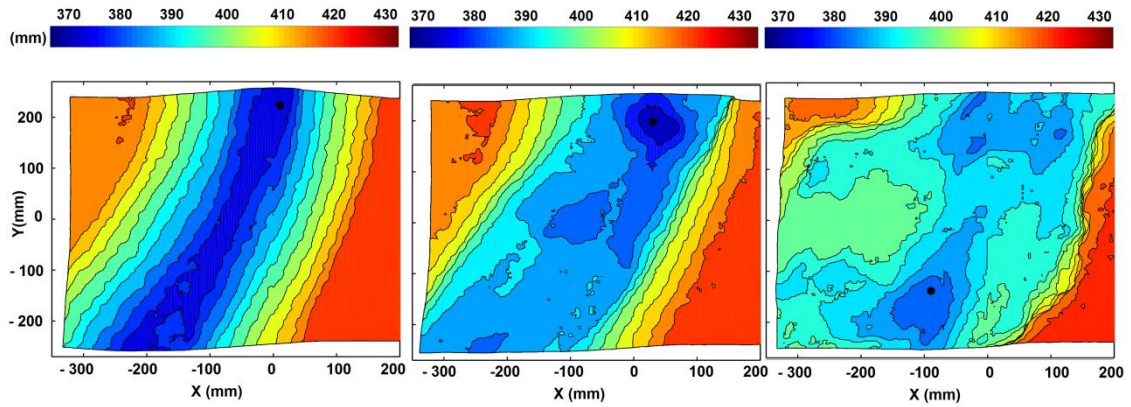


Figura 157: curvas hipsométricas de la sección relevada, a la izquierda a los 5 minutos de ensayo, en el centro a las 6 hs y a la derecha a las 40 hs. El experimento corresponde a la Geometría 6, con un caudal de 0.16 l/s y una pendiente de 1.2%.

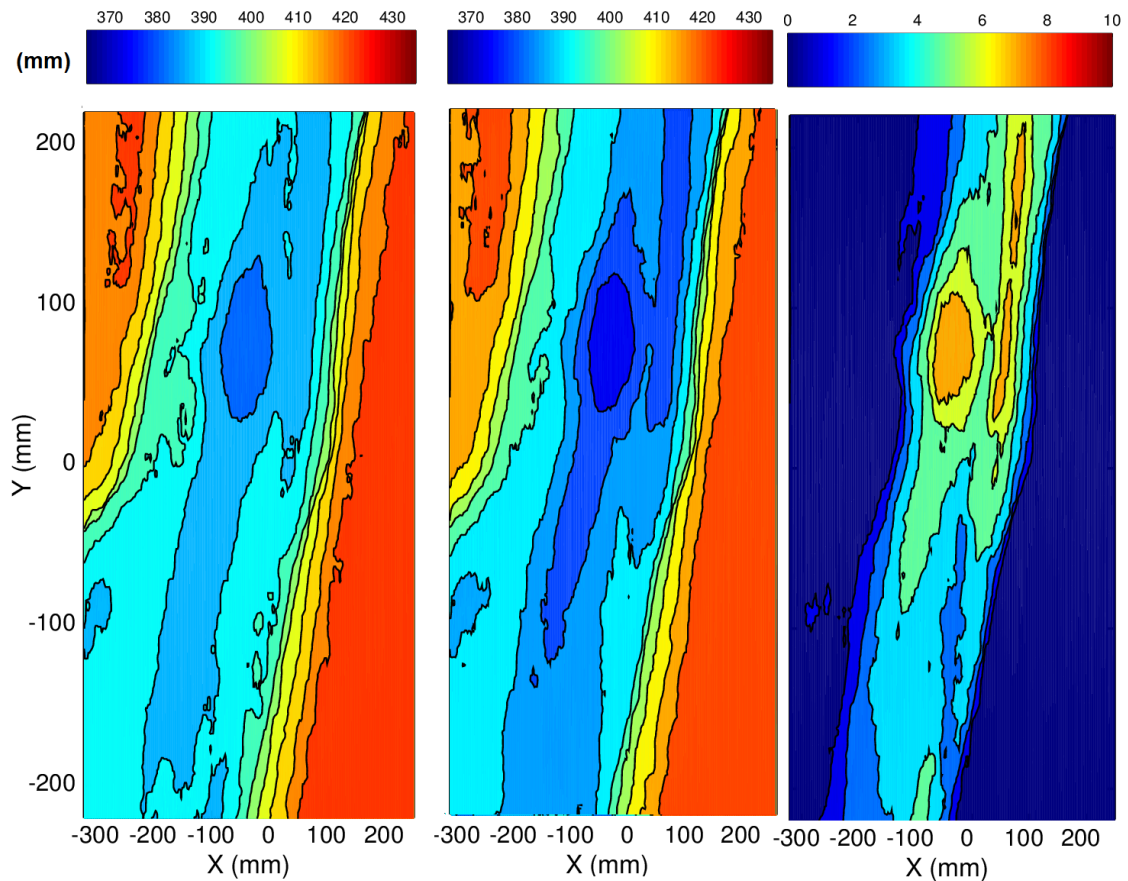


Figura 158: isolneas de la superficie relevada a las 7 hs de ensayo, a la izquierda las correspondientes a las mediciones sin corregir, al centro las corregidas y a la derecha las isolneas de las correcciones realizadas. El experimento corresponde a la Geometría 6, con un caudal de 0.16 l/s y una pendiente de 1.2%.

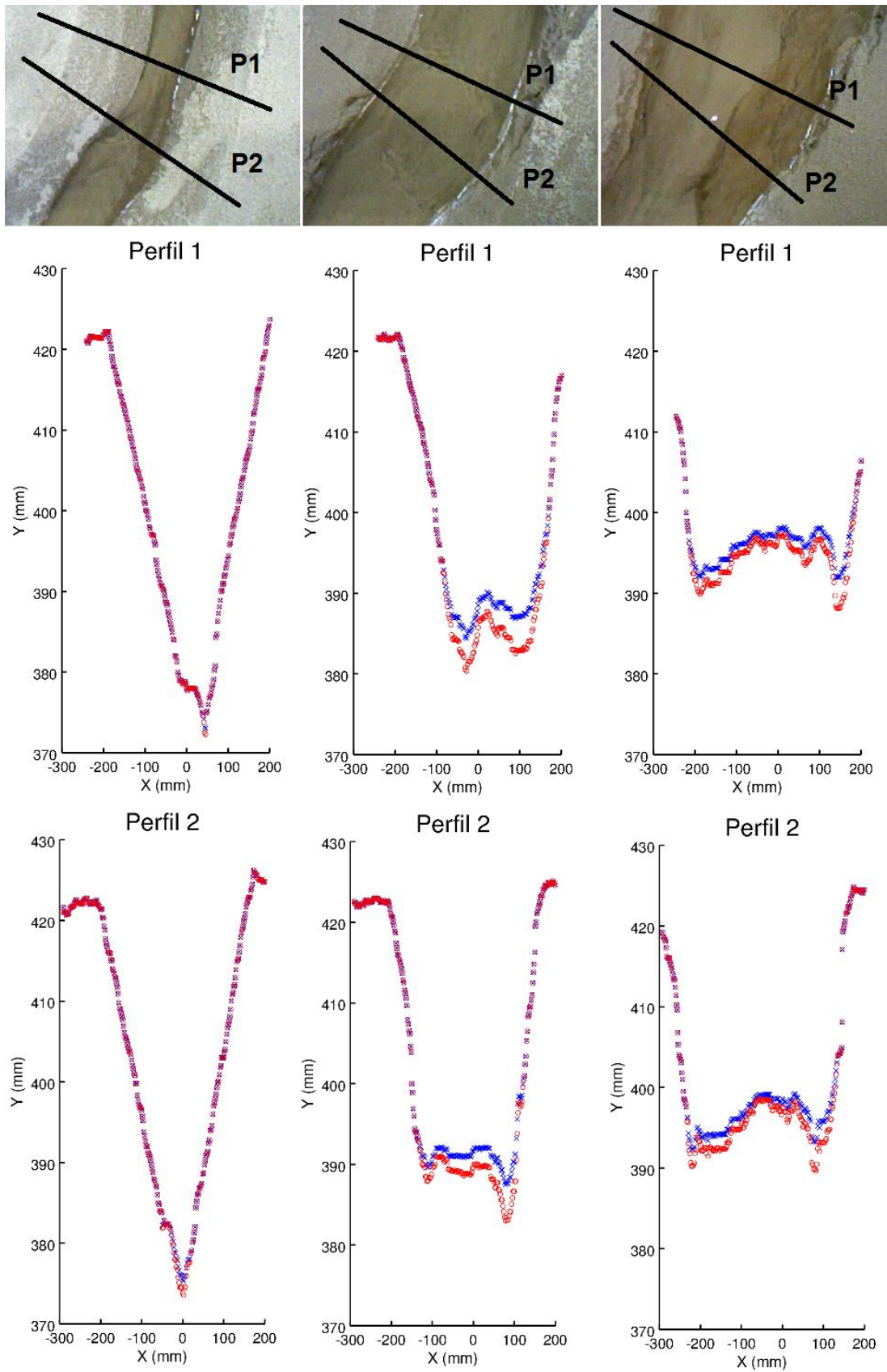


Figura 159: en la columna de la izquierda, la imagen RGB y los perfiles señalados a los 5 minutos de ensayo, en la central a las 6 hs y a la derecha a las 40 hs. En todos los casos los puntos azules son sin corregir y los rojos corregidos. El experimento corresponde a la Geometría 6, con un caudal de 0.15l/s y una pendiente de 1.8%.

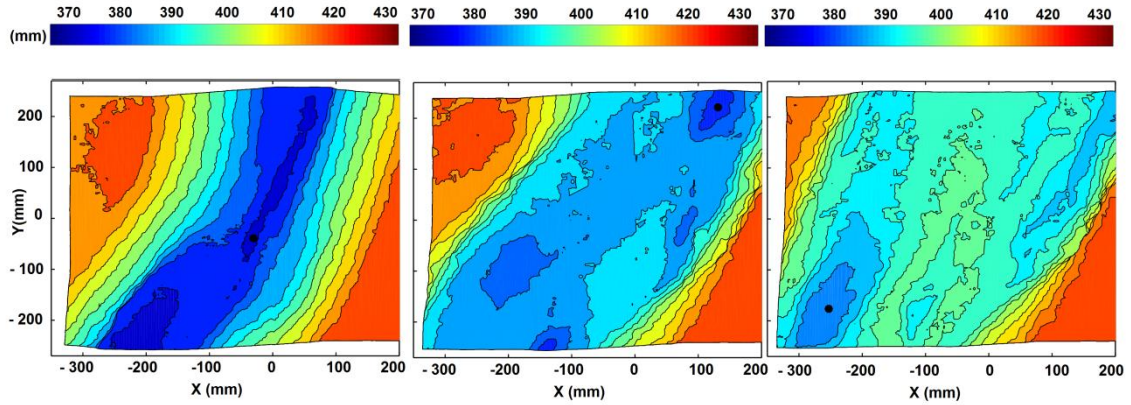


Figura 160: curvas hipsométricas de la sección relevada, a la izquierda a los 5 minutos de ensayo, en el centro a las 6 hs y a la derecha a las 40 hs. El experimento corresponde a la Geometría 6, con un caudal de 0.15 l/s y una pendiente de 1.8%.

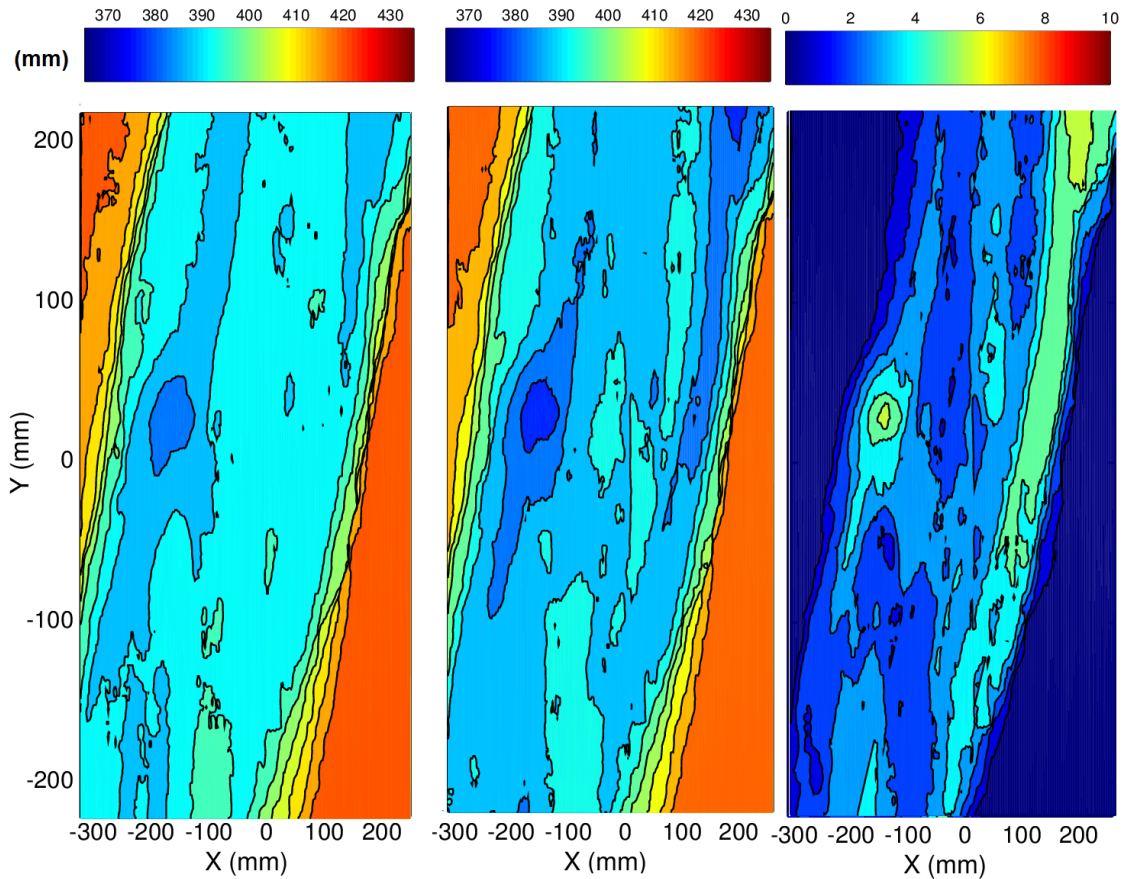


Figura 161: isolneas de la superficie relevada a las 6 hs de ensayo, a la izquierda las correspondientes a las mediciones sin corregir, al centro las corregidas y a la derecha las isolneas de las correcciones realizadas. El experimento corresponde a la Geometría 6, con un caudal de 0.15 l/s y una pendiente de 1.8%.