

## **Informe Final del Proyecto Interno HC-1411.1**

### **Monitoreo del nivel del agua con un Lidar inclinado**



**Subcoordinación de Hidráulica Ambiental e Hidrometría**

**Serge Tamari**

**Luis Alberto Bravo Inclán**

**José Javier Sánchez Chávez**

**Diciembre de 2014**

Tamari S., Bravo Inclán L.A., Sánchez Chávez J.J. 2014.  
*Informe final del proyecto interno HC-1411.1 (Monitoreo del nivel del agua con un Lidar inclinado)*. Jiutepec (Mor.): Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

# Índice

## **Resumen ejecutivo**

- 1 Antecedentes
- 2 Actividades realizadas
- 3 Resultados obtenidos

## **Anexos: Entregables**

- A.1 Artículo publicado por un congreso nacional a comité de lectura
- A.2 Artículo publicado por una revista a comité de lectura
- A.3 Dos certificados de registro de *software*

## **Anexos: Detalles sobre las principales actividades realizadas**

- B.1 Anexo fotográfico
- B.2 Código fuente (Matlab) para procesar los datos de un Lidar

## **Anexos: Ordenes de servicio**

- C.1 Orden de servicio para reparar un Lidar
- C.2 Geoposicionamiento de puentes de aforo en Morelos



# Resumen ejecutivo

## 1 Antecedentes

La problemática considerada en el Proyecto Interno HC-1411.1 se relaciona con la hidrometría, en específico: *monitorear el tirante en lagos*. <sup>(1)</sup> Hace tres años, el personal del IMTA demostró la factibilidad de utilizar un LIDAR (distanciómetro laser infrarrojo) inclinado para detectar una superficie de agua turbia. <sup>(2)</sup>

Después, se han instalado dos LIDAR en condiciones de campo (embalses de "Cointzio" y de "Valsequillo") y se ha monitoreado su señal durante casi dos años. Debido a que los datos enviados por ambos Lidar resultaron ser bastante ruidosos, se vio la necesidad de desarrollar y validar un algoritmo robusto para filtrar estos datos.

Por lo anterior, el objetivo del Proyecto ha sido: *desarrollar y validar un algoritmo para filtrar los datos enviados por un LIDAR colocado en la orilla de un embalse (turbio)*.

---

<sup>(1)</sup> Cabe destacar que esta problemática se alinea con el tercer eje consignado en el primer mensaje a la nación del Presidente de México (01/12/ 2012) en el que se promueve el uso de las herramientas emanadas del saber científico y tecnológico de punta. También se relaciona con el punto 2.3 del Pacto por México, al atender prioridades y problemas tangibles en materia de agua.

<sup>(2)</sup> Referencias:

➤ TAMARI S. 2012. Evaluación de dos métodos emergentes para monitorear el nivel del agua. *Informe final del Proyecto HC-1204.1*. IMTA, Diciembre de 2012 (vers. 1.0), 78 p.

➤ TAMARI S., MORY J., GUERRERO-MEZA V. 2011. Testing a near-infrared Lidar mounted with a large incidence angle to monitor the water level of turbid reservoirs. *ISPRS J. Photogram. and Remote Sensing* 66 (6 Supplement): S85-S91. [[doi:10.1016/j.isprsjprs.2011.01.009](https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2011.01.009)]

## 2 Actividades realizadas

Las principales actividades realizadas fueron las siguientes:

1. *Revisión bibliográfica:* interacciones entre la luz de un Laser y una agua con partículas en suspensión, perfiles verticales de concentración de sedimentos en lagos. También se hará una prospectiva sobre nuevos temas de investigación (incluyendo visitas de laboratorio y salidas de campo).
2. *Recopilar datos:* distancias medidas por los Lidar, tirantes medidos por la CONAGUA, transparencia del agua (medida con discos de Secchi), datos climáticos (lluvia, temperatura, viento).
3. *Procesar datos:* buscar un filtro para depurar los datos de los Lidar (por lo menos, en función de la intensidad de la señal recibida), comparar los datos filtrados de los Lidar con los datos de referencia (tirante en lagos), investigar el alcance de la técnica de estimación de tirante con Lidar (por lo menos, en función de la transparencia del agua).
4. *Presentar los resultados:* redacción de artículos, participación en un congreso nacional, redacción de un informe final del proyecto.

### 3 Resultados obtenidos

Los principales resultados obtenidos durante el desarrollo del proyecto fueron:

- *Productos relacionados con la temática del proyecto*

- Se publicó [un artículo in extenso en las memorias de un congreso nacional](#) (con comité de lectura), donde se presentan los principales resultados obtenidos durante el desarrollo del proyecto. [ver **Anexo A.1**]

Nota: todavía se necesita coleccionar más datos y analizarlos (sobre todo, una señal débil que sugiere que los LIDAR detectan a veces una estratificación dentro de la columna de agua), antes de considerar publicar los resultados en una revista con comité de lectura: se planea hacerlo dentro de cinco meses (mayo de 2015).

- *Otros productos*

- Se publicó [un artículo en una revista con comité de lectura](#), sobre el tema: estimación de la velocidad superficial del agua con un radar portátil de efecto Doppler. [ver **Anexo A.2**]

- Se obtuvieron también [dos certificados para registro de software](#): uno para determinar las fugas en edificios con tinaco y el otro para optimizar el diseño de un picnómetro de gas. [ver **Anexo A.3**]





## **Anexo A.1**

**Artículo publicado por un congreso  
nacional a comité de lectura**



## MONITOREO DEL TIRANTE EN EMBALSES TURBIOS CON UN DISTANCIÓMETRO LÁSER INCLINADO

Tamari Serge<sup>1</sup>, Guerrero-Meza Vicente<sup>2</sup>, Rifad Younès<sup>3</sup> & Bravo-Inclán Luis<sup>1</sup>

<sup>1</sup>IMTA. Paseo Cuauhnáhuac No. 8532, Col. Progreso, Jiutepec, Mor. 62550, México.

<sup>2</sup>DISIME S.A. de C.V., Playa Villa del Mar No. 180, Col. Militar Marte, Del. Iztacalco, D.F. 08830, México.

<sup>3</sup>EMD, 941 rue Charles Bourseul, 59508 Douai, Francia.

[tamari@tlaloc.imta.mx](mailto:tamari@tlaloc.imta.mx), [vguerrero@disime.com.mx](mailto:vguerrero@disime.com.mx), [younes.rifad@minesdedouai.fr](mailto:younes.rifad@minesdedouai.fr), [lubravo@tlaloc.imta.mx](mailto:lubravo@tlaloc.imta.mx)

### Resumen

Cuando el talud de un embalse es inclinado, resulta complicado implementar las técnicas convencionales para monitorear el tirante. En este contexto, se ha propuesto una técnica que consiste en instalar un distanciómetro láser ("LIDAR") sobre un talud y orientarlo de tal forma que apunta hacia el espejo del agua con un gran ángulo de incidencia (desde  $\approx 30^\circ$  hasta  $70^\circ$ ). La técnica asume que el instrumento logra detectar -por "efecto Tyndall"- partículas en suspensión que se encuentran un poco por debajo del espejo del agua.

Por primera vez, se presenta una evaluación a largo plazo de la técnica propuesta, la cual se inició hace tres años en los embalses de "Cointzio" (Mich.) y "Valsequillo" (Pue.). En la orilla de cada embalse, se instaló un distanciómetro comercial programado para tomar datos varias veces al día. En paralelo, se estuvo midiendo el tirante (con una escala convencional) y la transparencia del agua (con un disco de Secchi).

Se obtuvieron los siguientes resultados: (1) los distanciómetros proporcionan datos erráticos, pero que se pueden filtrar con un algoritmo sencillo, (2) los instrumentos probados solo proporcionan datos confiables cuando el agua es suficientemente turbia (profundidad de Secchi menor a  $\approx 1.4$  m) y (3) los datos confiables de distancia se pueden utilizar -después de una calibración sencilla- para estimar un valor de tirante por día con una incertidumbre de  $\pm 10$  cm [ $p = 0.95$ ]. A pesar de que la técnica propuesta es poco precisa, podría aplicarse a algunos embalses de tierra y lagos; requiere de un sensor moderadamente costoso ( $\approx 30\ 000$  MN) y se puede implementar fácilmente en un lugar seguro (como es el techo de una caseta de operación).

### Introducción

Las técnicas convencionales para monitorear el tirante en cuerpos de agua (IOC, 2006; ISO, 2008; Sauer & Turnipseed, 2010) son difíciles de implementar en los embalses con un talud inclinado. De hecho, si se utiliza un sensor de nivel emergido (sensor ultrasónico, radar o láser convencionales), debe colocarse verticalmente por encima del agua. Mientras que si se utiliza un sensor de presión (*e.g.*, Tamari & Aguilar-Chávez, 2010), debe sumergirse una parte del sistema de medición, lo cual puede traer problemas de corrosión y/o incrustación.

Por lo anterior, se ha propuesto recientemente (Tamari *et al.*, 2011) una técnica para monitorear el tirante en embalses. Es una alternativa que sólo funciona cuando el agua es suficientemente turbia. La técnica utiliza un distanciómetro láser que se coloca sobre un talud y que se orienta de tal forma que apunta hacia el espejo del agua (**Fotografía 1**). En este trabajo, se presenta la primera evaluación a largo plazo de la técnica propuesta.

### Antecedentes

#### Popularidad de los distanciómetros láser

Los distanciómetros láser (o "LIDAR", por sus siglas en inglés) se han vuelto populares en los últimos 20 años (*e.g.*, Amann *et al.*, 2001). En la actualidad, se consiguen aparatos comerciales que pueden medir distancias desde 0.5 m hasta decenas de metros, con una incertidumbre del orden de  $\pm 2$  mm [ $p = 0.95$ ] (*e.g.*, Tamari *et al.*, 2010). A continuación, se consideran los distanciómetros que funcionan según el principio del tiempo de travesía (o "TOF", por sus siglas en inglés) aplicado a la luz, es decir: determinan una distancia ( $D$ , m) conociendo la velocidad de la luz en el aire ( $c \approx 3 \times 10^8$  m/s) y midiendo el tiempo que tarda un impulso de luz para ir hacia un blanco y regresar hacia el aparato ( $\Delta t$ , s):

$$D = c \times \Delta t / 2 \quad (1)$$



Fotografía 1. Sistema de medición con distanciómetro láser inclinado, adquisición de datos, antena de radio y panel solar.

### Uso convencional de los distanciómetros láser

Un distanciómetro láser no funcionará si el haz de luz que emite no está re-enviado por el blanco hacia el instrumento. Por lo tanto, las formas convencionales de usar un distanciómetro láser son las siguientes: (1) para medir la distancia hacia una superficie *difusa* (es decir, una superficie que refleja la luz en cualquier dirección, como es el caso de una hoja de papel), el instrumento puede apuntar al blanco desde virtualmente cualquier ángulo de incidencia y (2) para medir la distancia hacia una superficie *especular* (es decir, una superficie que refleja la luz como lo haría un espejo), el instrumento debe colocarse perpendicularmente a la superficie (con un ángulo de incidencia relativo menor a  $\approx 10^\circ$ ; e.g., Höfle *et al.*, 2009; Li *et al.*, 2010).

En la práctica, una superficie quieta de agua se comporta como una superficie especular con respecto a la luz emitida por un láser. Por lo tanto, la forma tradicional de medir la distancia hacia el espejo del agua con un distanciómetro láser requiere colocar el instrumento verticalmente (e.g., Alsdorf *et al.*, 2007).

### Fundamentos de la técnica propuesta

Al contrario de la técnica clásica para medir la distancia hacia el espejo del agua con un distanciómetro vertical, la técnica propuesta para monitorear el tirante en embalses turbios (Tamari *et al.*, 2011) consiste en instalar el distanciómetro sobre un talud y orientarlo de tal forma que apunta hacia el espejo del agua con un gran ángulo de incidencia (entre  $\approx 30^\circ$  y  $70^\circ$ ).

La técnica asume que el distanciómetro logra detectar -por "efecto Tyndall"- partículas en suspensión que se encuentran un poco por debajo del espejo del agua (considerando un láser que emite en el próximo-infrarrojo, en la práctica no debería detectar partículas a más de  $\approx 0.3$  m de profundidad; e.g., Höfle *et al.*, 2009; Brodu & Lague, 2012). En estricto sentido, no se "mide" la distancia hacia el espejo del agua, sino una distancia un poco mayor.

### Necesidad de calibrar la técnica propuesta

Si un distanciómetro láser inclinado logra detectar la superficie del agua (o una capa un poco por debajo), se puede estimar el tirante de la siguiente manera (véase **Ilustración 1**):

$$H = H_0 - D \times \cos(\theta) \quad (2)$$

donde  $H$  (m) es el tirante,  $H_0$  (m) es la altura del láser con respecto al fondo del embalse (o una posición de referencia),  $D$  (m) es la distancia medida por el láser y  $\theta$  ( $^\circ$ ) es el ángulo de incidencia del láser. En este caso, cuando se instala un distanciómetro láser en una posición fija, basta determinar los valores de  $H_0$  y de  $\cos(\theta)$  para poder monitorear el tirante en un embalse. En la práctica, dichos valores se pueden determinar fácilmente mediante una calibración de campo (similar a la que se requiere cuando se pretende estimar el tirante con un sensor de presión).

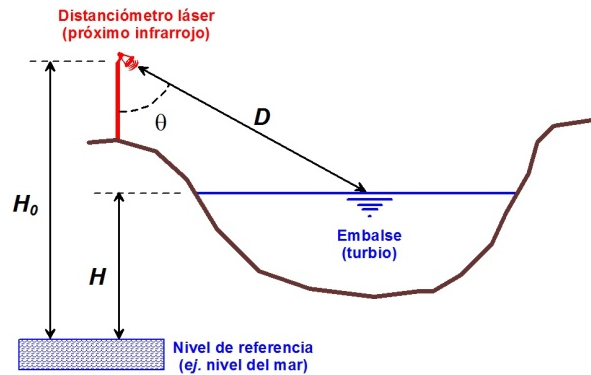


Ilustración 1. Esquema del sistema de medición con distanciómetro láser inclinado.

## Materiales y métodos

### Selección de un distanciómetro

Para evaluar la técnica propuesta, se consideraron modelos comerciales de distanciómetros con las siguientes características: láser que emite en el próximo-infrarrojo ( $\lambda = 905$  nm), instrumento que puede conectarse a un *datalogger* por medio de un puerto serie e instrumento que no sea muy costoso ( $< 30\ 000$  MN). Sin embargo, algunas pruebas preliminares mostraron que ciertos modelos comerciales de distanciómetro detectan más fácilmente una superficie de agua turbia que otros. Así, Tamari *et al.* (2011) probaron dos modelos de la misma marca ("Optech Inc.", Vaughan, Canada), encontrando que el modelo "Watchman 3100-SR" (firmware 35-AWLX-2.0) proporcionaba mejores resultados que el modelo "Sentry SR" (firmware SR-V2.8). De igual manera, se probaron durante este estudio dos modelos de otra marca ("Laser Technology Inc.", Centennial CO; **Fotografía 2**), encontrándose que el modelo "TruSense S200" (firmware 1.11.4) proporcionaba mejores resultados que el modelo "ULS" (firmware 1.0.5).



Fotografía 2. Soporte inclinado con tres instrumentos: (izq.) distanciómetro láser "TruSense S200", (centro) inclinómetro "MTi" y (der.) distanciómetro láser "ULS".

### Verificación preliminar del distanciómetro

Por lo anterior, solo se reportan a continuación los resultados obtenidos con el distanciómetro "TruSense S200". Según su fabricante (LTI, 2011), puede medir distancias desde 0.5 hasta 750 m con una incertidumbre de  $\pm 40$  mm. Sin embargo, el fabricante -al igual que muchos otros- no menciona con qué nivel de confianza reporta esta incertidumbre. Por lo tanto, se verificó en el laboratorio la incertidumbre del distanciómetro para medir distancias (desde 0.5 hasta 50 m) hacia una superficie difusa (hoja de papel blanco), comparándolo con un distanciómetro láser de bolsillo (modelo "Disto A6", marca "Leica Geosystems", Heerbrugg, Switzerland) que es mucho más preciso para este tipo de aplicación (*e.g.*, Tamari *et al.*, 2010). Así, se encontró que el "TruSense S200" (dos instrumentos probados) subestima las distancias de  $\approx 30$  mm; sin embargo, si se corrige este sesgo, la incertidumbre del distanciómetro resulta ser de  $\pm 40$  mm [ $p = 0.95$ ].

### Configuración del distanciómetro

A diferencia de otros distanciómetros comerciales más sencillos (como son los distanciómetros láser de bolsillo), el instrumento probado viene con distintas opciones para tratar de detectar un blanco en condiciones no ideales, es decir cuando se tienen varios objetos no totalmente opacos en la línea de vista (en este caso, la intensidad de la luz reflejada por cada objeto dependerá de su opacidad y de su distancia). En el campo, esta situación podría presentarse -por ejemplo- si llueve, si hay neblina, si el viento transporta mucho polvo o si pasan mosquitos en frente del distanciómetro.

Así, el modelo de distanciómetro probado puede medir una distancia de tres modos: "primer pulso", "pulso más intenso" y "último pulso". El fabricante (LTI, 2011) recomienda utilizar el primer modo en condiciones ideales (es decir, cuando solo hay un blanco opaco en la línea de vista), y los dos otros modos en condiciones no ideales. Durante este estudio, se probaron sistemáticamente los tres modos (al contrario de lo que se hizo durante el estudio de Tamari *et al.*, 2011), encontrándose que los modos "primer pulso" y "pulso más intenso" proporcionaban los mejores resultados. Por lo anterior, solo se presentan a continuación los resultados obtenidos con el modo "pulso más intenso".

A parte de eso, se dejó configurado el modelo de distanciómetro probado para que tome libremente ("sin supervisión") cualquier dato de distancia, es decir: independientemente de lo que se ha medido antes e independientemente de lo que se podría considerar como realista *a priori*.

### Instrumentación de dos embalses

La evaluación se inició hace tres años en dos sitios: el embalse de "Cointzio" (Mich.; 19° 37' 51" N - 101° 15' 29" O), que es extremadamente turbio debido a la presencia de suelos muy erosionables (Susperregui *et al.*, 2009) y el embalse de "Valsequillo" (Pue.; 18° 54' 45" N - 98° 06' 32" O), que es muy turbio debido a la presencia de aguas residuales (provenientes de las ciudades de Puebla y Tlaxcala).

En la orilla de cada embalse, se instaló un mástil con un distanciómetro láser (protegido de los rayos del sol por una tapa metálica, para evitar el sobrecalentamiento) y un sistema de adquisición de datos. Los distanciómetros estaban apuntando hacia el espejo del agua con un gran ángulo de incidencia:  $\theta = 71^\circ$  en "Cointzio" y  $\theta = 62^\circ$  (antes de 2014) y  $64^\circ$  (después de 2014) en "Valsequillo", según las mediciones proporcionadas por un inclinómetro con una tolerancia  $< 1^\circ$  (modelo "MTi", Xsens Technologies, Enschede, The Netherlands). El cambio de ángulo de incidencia en "Valsequillo" se puede explicar de la siguiente manera: después de una falla del distanciómetro a mediados de 2013 (debido a un corto-circuito que no se debía al instrumento mismo), se tuvo que cambiar el instrumento por otro; en este momento, los sensores del mástil que soportaba el distanciómetro probablemente se relajaron un poco (algún problema que podría evitarse en el futuro, con un soporte más rígido para el distanciómetro).

Después, se dejaron los distanciómetros programados para tratar de medir distancias ( $D$ , m) cada 10 min. (un intento consistía en enviar una ráfaga de 16 pulsos de luz con una frecuencia de 12 Hz, y si el intento no daba resultado, se hacían hasta 16 intentos sucesivos). Los datos crudos de distancia se almacenaron en un *datalogger* (modelo "CR-1000", Campbell Scientific, Logan, USA). También se almacenaron informaciones sobre la intensidad de la señal recibida por los distanciómetros durante cada medición, sobre todo un índice denominado  $I$  y que puede variar desde 0 hasta 4: según el fabricante del distanciómetro (LTI, 2011), el valor de  $I$  aumenta con la intensidad de la señal recibida.

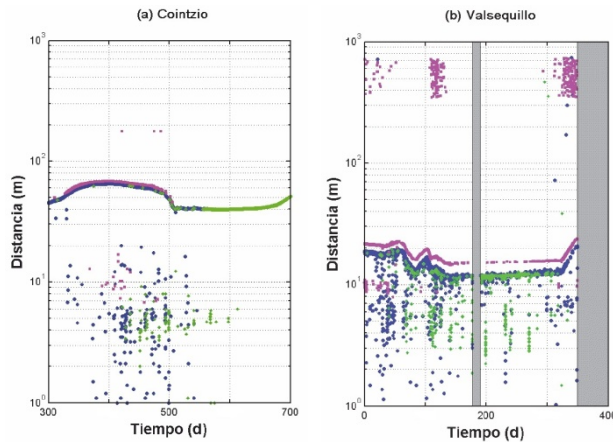
En paralelo, se estuvo midiendo cada día el tirante en los embalses ( $H_{ref}$ , msnm) con una escala convencional (graduada en "msnm", es decir referenciada al nivel sobre el mar). También se estuvo midiendo cada semana la "profundidad de Secchi" ( $Z_D$ , m), lo cual permite apreciar rápidamente la transparencia del agua (Davies-Colley & Smith, 2001).

## Resultados

### Análisis y filtrado de los datos crudos

En forma similar a lo que se había observado durante un estudio previo (Tamari *et al.*, 2011), los datos crudos de distancia registrados por los distanciómetros probados fueron muy erráticos (**Ilustración 2**). Sin embargo, se encontró empíricamente que estos datos podían agruparse en función de la intensidad de la señal recibida ( $I$ ):

1. Por un lado, una intensidad alta ( $I = 4$ ) indicaba la detección de objetos flotando sobre la superficie del agua (a menos que algún objeto opaco -como pudiera ser un pájaro- haya pasado en frente del distanciómetro). Tal como se verá a continuación, esta situación ocurrió durante la prueba realizada en "Cointzio", debido a una mancha de lirio acuático (*Eichhorniae crassipes*) que permaneció durante varios meses (**Fotografía 3**).
2. Por otro lado, una intensidad moderada ( $I = 3$ ) indicaba a menudo la detección del espejo del agua (a menos que algún objeto translucido -como pudiera ser una nube de mosquitos o una fuerte lluvia- hubiera pasado en frente del distanciómetro).



**Ilustración 2. Datos crudos (ejemplo) registrados con los distanciómetros. Los colores indican la intensidad de la señal recibida: (verde) "I = 4", (azul) "I = 3" y (magenta) "I = 2".**

- Finalmente, una intensidad más baja ( $I = 2$ ) indicaba la detección de otros rasgos; sin embargo, su análisis está fuera del alcance del presente trabajo.

Por lo anterior, y en forma similar a lo que se había hecho durante un estudio previo (Tamari *et al.*, 2011), se tuvieron que filtrar los datos crudos de distancia registrados por los distanciómetros láser. Después de un análisis preliminar, se encontró un algoritmo sencillo para hacerlo:

- Eliminar los valores extremos (guardar:  $1 < D < 100$  m).
- Solo guardar los datos asociados a una intensidad de la señal moderada ( $I = 3$ ), es decir: los datos probablemente relacionados con la detección del espejo del agua.
- Agrupar los datos guardados por día, y calcular la mediana.
- Solo guardar las medianas que se han calculado con un número suficiente de datos ( $n_d \geq 50$ , es decir: por lo menos 35% de lo que se podría tener, considerando que se estaban tomando 144 datos crudos por día).



**Fotografía 3. Mancha de lirio acuático en "Cointzio", vista desde la caseta donde se encuentra el distanciómetro láser (13/12/2013).**

También se puede aplicar el algoritmo anterior a los datos crudos asociados a una intensidad de la señal alta ( $I = 4$ ); en este caso, los datos filtrados deberían relacionarse con la detección de objetos flotando, como es el lirio acuático.

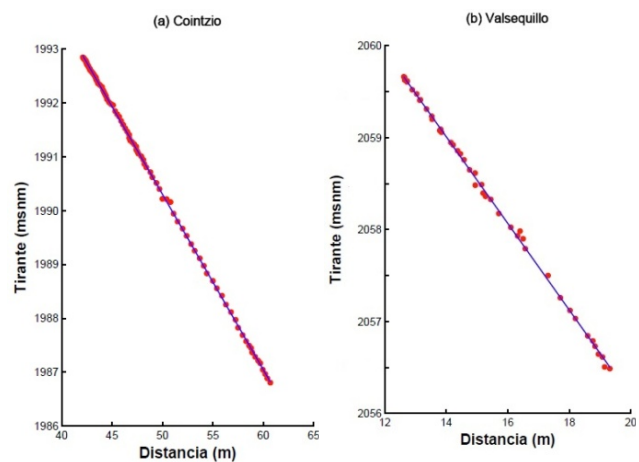
Desafortunadamente, el algoritmo propuesto sólo permite estimar un valor confiable de distancia al día. Y tal como se verá a continuación, sólo se consigue una estimación confiable si el agua es suficientemente turbia. Ahora bien, el algoritmo propuesto tiene la ventaja de ser robusto: cada día, se estima un valor de distancia sin *a priori* (es decir, independientemente de lo que se ha estimado antes).

### Calibración de la técnica propuesta

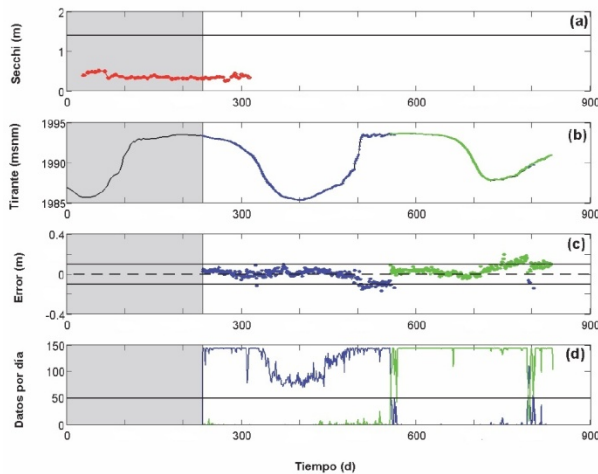
Se calibraron los sistemas de medición con distanciómetro láser de la siguiente manera:

- Elegir un período que corresponde a una fase de llenado o de vaciado del embalse ( $\approx 3$  meses, en la práctica).
- Filtrar los datos de distancia con el algoritmo propuesto (para una intensidad de la señal moderada:  $I = 3$ ).
- Establecer la relación experimental entre las distancias medidas por el distanciómetro ( $D$ ) y los tirantes observados en las mismas fechas ( $H_{ref}$ ). Esto consiste en hacer una regresión lineal, de acuerdo con la Eq. 2.

El resultado de las calibraciones fue satisfactorio (**Ilustración 3**), con residuos de regresión típicamente menores a 50 mm (es decir, similares a la incertidumbre del distanciómetro probado, cuando trabaja en condiciones ideales). Según la pendiente de las rectas de calibración, el ángulo de incidencia del distanciómetro  $\theta$  era  $70.99^\circ$  en "Cointzio" y  $61.87^\circ$  (antes de 2014) o  $62.28^\circ$  (después de 2014) en "Valsequillo", lo cual es consistente con las mediciones directas obtenidas con un inclinómetro. Además, se tuvieron estimaciones de  $H_0$  muy similares (diferencia  $< 7$  mm) con las dos calibraciones realizadas en "Valsequillo".



**Ilustración 3. Rectas de calibración de los distanciómetros láser: (a) "Cointzio" y (b) "Valsequillo" (antes de 2014).**



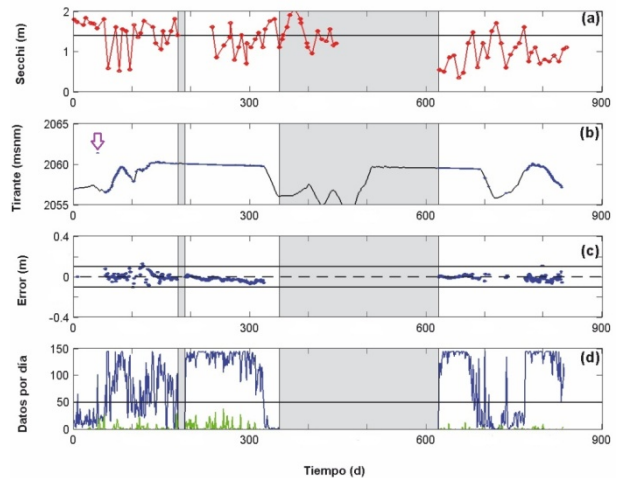
**Ilustración 4.** Datos obtenidos en "Cointzio": (a) Transparencia del agua, (b) Tirante (línea delgada: datos de referencia; puntos azules: estimaciones basadas en la detección del espejo del agua; puntos verdes: estimaciones basadas en la detección de objetos flotando), (c) Error de la técnica propuesta (*i.e.*, tirantes estimados menos datos de referencia), (d) Número de datos disponibles para poder estimar un valor de tirante con la técnica propuesta. El día "0" corresponde al 10 de mayo de 2012. Las áreas en gris indican períodos durante los cuales se tuvieron fallas en la adquisición de datos.

### Estimaciones de tirante

El resultado de la evaluación a largo plazo de la técnica propuesta para estimar el tirante se presenta en la **Ilustración 4** para "Cointzio" y en la **Ilustración 5** para "Valsequillo". Por desgracia, se perdieron datos durante algunos períodos (marcados en gris), debido a fallas eléctricas de los sistemas de adquisición de datos.

En el caso de "Cointzio", se verificó que el embalse era extremadamente turbio, con una profundidad de Secchi de  $\approx 0.4$  m (**Ilustración 4a**). Bajo estas condiciones, la técnica propuesta proporcionó estimaciones de tirante cada día (**Ilustración 4b**). Mientras el distanciómetro detectaba una superficie libre de agua (asociada a una intensidad moderada de la señal recibida:  $I = 3$ ), estas estimaciones fueron consistentes con los datos de referencia en un rango de  $\pm 100$  mm [ $p = 0.95$ ] (véase los puntos azules de la **Ilustración 4c**).

Sin embargo, el distanciómetro láser instalado en "Cointzio" también detectó durante varios meses (véase la curva verde en la **Ilustración 4d**) la presencia de objetos flotando sobre la superficie del agua (asociado con una intensidad alta de la señal recibida:  $I = 4$ ), lo cual es consistente con las observaciones de campo: durante el mismo período, se tuvo una mancha de lirio acuático en la línea de vista del distanciómetro (**Fotografía 3**). Bajo estas condiciones, se tuvo una mayor discrepancia entre los tirantes estimados con la técnica propuesta y los datos de referencia (véase los puntos verdes de la **Ilustración 4c**). Obviamente, la presencia de objetos flotando puede producir un sesgo cuando se intenta estimar el tirante con un sensor emergido, y la magnitud del sesgo dependerá de la altura de los objetos. Ahora bien, en comparación con los sensores ultrasónicos o radar convencionales para estimar el tirante, la técnica propuesta permite darse cuenta fácilmente de esta situación.



**Ilustración 5.** Datos obtenidos en "Valsequillo" (misma leyenda que para la Ilustración anterior).

En el caso de "Valsequillo", se encontró que la transparencia del agua variaba bastante, con una profundidad de Secchi comprendida entre 0.4 y 2.1 m (**Ilustración 5a**; al respecto, no se encontró una relación clara entre estas variaciones y la precipitación). Bajo estas condiciones, la técnica propuesta no pudo proporcionar estimaciones de tirante todos los días (**Ilustración 5b**), sino sólo cuando la profundidad de Secchi era  $< 1.4$  m (lo cual concuerda con pruebas preliminares de laboratorio, que no se presentan por falta de espacio).

Mientras el agua del embalse era suficientemente turbia para que se pudieran estimar valores de tirante, el error de la técnica propuesta permaneció en un rango de  $\pm 100$  mm [ $p = 0.95$ ] (**Ilustración 5c**), al igual que para el caso de "Cointzio". Sólo se tuvo una estimación irrealista de tirante (véase flecha en la **Ilustración 5b**), sin saber por qué.

Al contrario de "Cointzio", las condiciones en "Valsequillo" no son favorables para aplicar la técnica propuesta. Sin embargo, el mérito de la prueba realizada en "Valsequillo" ha sido corroborar los alcances de la técnica.

## Discusión

### Comparación con trabajos anteriores

Cuando se propuso la técnica descrita aquí (Tamari *et al.*, 2010), se demostró su factibilidad mediante algunas pruebas de laboratorio y de campo, concluyendo que se podía estimar el tirante en menos de un minuto y con una incertidumbre de  $\pm 50$  mm [ $p = 0.95$ ]. Sin embargo, se utilizó otro modelo de distanciómetro (dos veces más costoso). Además, sólo se hizo una prueba de campo de corta duración (10 días). Y sobre todo, sólo se pudo estimar el tirante cuando el agua era extremadamente turbia (profundidad de Secchi  $< 0.5$  m).

Recientemente (Streicher *et al.*, 2013), se ha probado una técnica similar a la propuesta, para monitorear el oleaje en un tanque de laboratorio. En este caso, se tuvo que soltar tierra en el agua hasta alcanzar una turbidez mayor a 40 NTU, lo cual corresponde también a una agua extremadamente turbia (*e.g.*, Davies-Colley & Smith, 2001).

### Utilidad de la técnica propuesta

En la actualidad, se considera (IOC, 2006; ISO, 2008; Sauer & Turnipseed, 2010; Tamari & Aguilar-Chávez, 2010) que las técnicas convencionales son capaces de monitorear el tirante con una incertidumbre [ $p = 0.95$ ] de  $\pm 3$  mm, cuando la técnica se implementa cuidadosamente y mientras el tirante varía en un rango pequeño, es decir: menor a  $\approx 3$  m. Cuando el tirante varía en un rango mayor (algo común en los embalses; véase **Ilustraciones 4b & 5b**), se considera como muy satisfactorio lograr una incertidumbre igual a  $\pm 10$  mm. En este contexto, la técnica propuesta es poco precisa. Quizás se podría mejorar su precisión con distanciómetros láser más sofisticados que los que se han utilizado en este trabajo; sin embargo, se necesitarían más investigaciones para saberlo.

Otra desventaja de la técnica propuesta, es que no funciona en cualquier embalse, sino sólo en los embalses muy turbios (profundidad de Secchi menor a  $\approx 1.4$  m). Entonces la técnica solo podría aplicarse a los siguientes casos: (1) algunos embalses rodeados de suelos erosionables (e.g., Kent State University, 2014) como es el caso de "Cointzio" (Susperregui *et al.*, 2009), (2) algunos lagos someros expuestos al viento (e.g., Kristensen *et al.*, 1992) como es el caso del lago de Chapala (Alcocer & Bernal-Brooks, 2010), (3) lagos en un estado hipertrofico, así como algunos otros en un estado eutrófico (e.g., Dodds *et al.*, 2006; Bravo-Inclán *et al.*, 2010) y (4) embalses con aguas residuales.

A pesar de sus limitaciones, la técnica propuesta tiene unas ventajas prácticas. Por un lado, se puede implementar fácilmente en un lugar seguro (como es el techo de una caseta de operación). Y por otro lado, los tiempos y costos de instalación son bajos; una vez comprado un distanciómetro láser ( $< 30\ 000$  MN), se puede conectar fácilmente a un sistema de adquisición de datos y se puede instalar en el campo en menos de  $\approx 2$  horas.

### Otras posibles aplicaciones de la técnica

Aunque este trabajo se enfoca al monitoreo del tirante en embalses, la técnica propuesta *quizás* podría aplicarse también en algunos ríos, donde resulta complicado implementar técnicas convencionales (por cuestiones técnicas, de seguridad o de vandalismo) y donde se requiere un sistema de alerta temprana de avenida; de hecho, el agua de un río es generalmente muy turbia cuando empieza una avenida. En paralelo, sería una buena precaución instalar otras técnicas de medición sin contacto, como pudiera ser: un velocímetro "RADAR" capaz de detectar la velocidad en la superficie del agua cuando supera  $\approx 0.5$  m/s (e.g., Tamari *et al.*, 2014).

Finalmente, debe mencionarse que actualmente se están haciendo muchas investigaciones sobre la posibilidad de evaluar la turbidez en los cuerpos de agua mediante el uso de distanciómetros láser ("LIDAR") embarcados en un avión o en un satélite. En este contexto, el tipo de resultados obtenidos durante este trabajo -es decir: con un distanciómetro fijo y orientado con un gran ángulo de incidencia- quizás podría ser útil para corroborar algunas teorías (e.g., Li *et al.*, 2010) o aplicaciones (e.g., Churnside & Donaghay, 2009).

### Conclusión

Se ha presentado la primera evaluación a largo plazo de una nueva técnica sin contacto para monitorear el tirante en ciertos embalses. Dicha técnica consiste en instalar un distanciómetro láser (infrarrojo) sobre un talud y orientarlo con un gran ángulo de incidencia (desde  $\approx 30^\circ$  hasta  $70^\circ$ ), de tal forma que apunta hacia el espejo del agua. Los resultados muestran que con un distanciómetro comercial moderadamente costoso ( $\approx 30\ 000$  MN), se puede estimar el tirante con una incertidumbre de  $\pm 10$  cm [ $p = 0.95$ ], siempre y cuando el agua del embalse es suficientemente turbia (profundidad de Secchi  $< 1.4$  m). A pesar de que la técnica propuesta es poco precisa, se puede implementar fácilmente en un lugar seguro (como es el techo de una caseta de operación). Podría ser útil para monitorear el tirante en algunos embalses de tierra o lagos donde el agua es muy turbia: embalses rodeados de suelos erosionables, lagos someros expuestos al viento, lagos con problemas de eutrofización (desde un estado hipertrofico hasta un estado eutrófico) o embalses con aguas residuales.

### Agradecimientos

Se agradecen a Rubén Eric de la Cruz Rodríguez, Isaac Villaseñor Cabrera y Martín García Zacarías (Distrito de Riego 030 "Valsequillo", Pue.), así como a León Torres Aguilera y Pedro Larios Paredes (Distrito de Riego 020 "Morelia-Querendaro", Mich.) por haber hecho posible el desarrollo de las pruebas de campo.

Gracias a Salvador Cortés Tenorio y Cristián Osorio Campos (DISIME S.A. de C.V.) por su apoyo con la electrónica, a Raphaël Poncet (EMD, Douai, Francia) por su participación durante el análisis de los datos, así como a Delia por haber revisado el estilo de este documento.

Se indica la marca de los equipos usados solo para fines de identificación; sin embargo, pueden encontrarse equipos de otras marcas que tengan características similares.

### Referencias

- ALCOCER, J., & BERNAL-BROOKS, F.W. Limnology in Mexico. *Hydrobiologia*, Vol. 644, No. 1, 2010, pp. 1-54.
- ALSDORF, D.E., RODRIGUEZ, E. & LETTENMAIER, D.P. Measuring surface water from space. *Rev. Geophys.*, Vol. 45, 2007, paper RG2002
- AMANN, M.C., BOSCH, T., LESCURE, M., MYLLYLA, R. & RIOUX, M. Láser ranging: a critical review of usual techniques for distance measurement. *Opt. Eng.*, Vol. 40, 2001, pp. 10-19.
- BRAVO-INCLÁN, L.A., OLVERA-VIASCÁN, V., SÁNCHEZ-CHÁVEZ, J.J. & TOMASINI-ORTIZ, A.C. Trophic state assessment in warm-water tropical lakes and reservoirs of the central region of Mexico. *En: VAN BOCHOVE, E. & VANROLLEGHEM, P. (eds.), Proc. 14th International Conference, IWA Diffuse Pollution Specialist Group: Diffuse Pollution and Eutrophication (DIPCON 2010)*. Beaupré (Québec): Agriculture and Agri-Food Canada / IWA, 12–17 September 2010, pp. 35–39.



- BRODU, N. & LAGUE, D. 3D terrestrial lidar data classification of complex natural scenes using a multi-scale dimensionality criterion: Applications in geomorphology. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, Vol. 68, 2012, pp. 121-134.
- CHURNSIDE, J.H. & DONAGHAY, P.L. Thin scattering layers observed by airborne lidar. *ICES J. Marine Sci.*, Vol. 66, No. 4, 2009, pp. 778-789.
- DAVIES-COLLEY, R.J. & SMITH, D.G. Turbidity, suspended sediment, and water clarity: a review. *JAWRA*, Vol. 37, No. 5, 2001, pp. 1085-1101.
- DODDS, W.K., CARNEY, E. & ANGELO, R.T. Determining ecoregional reference conditions for nutrients, Secchi depth and chlorophyll-*a* in Kansas lakes and reservoirs. *Lake and Reservoir Management*, Vol. 22, No. 2, 2006, pp. 151-159.
- HÖFLE, B., VETTER, M., PFEIFER, N., MANDLBURGER, G. & STÖTTER, J. Water surface mapping from airborne laser scanning using signal intensity and elevation data. *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol. 34, No. 12, 2009, pp. 1635-1649.
- IOC. *Manual on sea-level measurements and interpretation, Volume IV: An update to 2006 (IOC Manuals and Guides No. 14, Vol. IV)*. Paris: Intergovernmental Oceanographic Commission / UNESCO, 2006, 78 pp.
- ISO. *Hydrometry – Water level measuring devices (ISO 4373:2008)*. Genève: International Organization for Standardization, 2008, 26 pp.
- KENT STATE UNIVERSITY. *The Secchi Dip-In* [en línea]. [citado el 20 de agosto de 2014]. Disponible para World Wide Web: [www.secchidipin.org](http://www.secchidipin.org).
- KRISTENSEN, P., SØNDERGAARD, M. & JEPPESEN, E. Resuspension in a shallow eutrophic lake. *Hydrobiologia*, Vol. 228, No. 1, 1992, pp. 101-109.
- LI, Z., LEMMERZ, C., PAFFRATH, U., REITEBUCH, O. & WITSCHAS, B. Airborne Doppler Lidar investigation of sea surface reflectance at a 355-nm ultraviolet wavelength. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, Vol. 27, No. 4, 2010, pp. 693-704.
- LTI. *TrueSense S200 User's manual (2<sup>nd</sup> edition)*. Centennial (CO): Laser Technology Inc. (ed.), 2011, 32 pp.
- SAUER, V.B. & TURNIPSEED, D.P. *Stage measurement at gaging stations*. Reston (Virginia): U.S. Geological Survey, 2010, 45 pp. ISBN 978-1-4113-2989-8. Disponible para World Wide Web: <http://pubs.usgs.gov/tm/tm3-a7/>.
- STREICHER, M., HOFLAND, B. & LINDENBERGH, R.C. Laser ranging for monitoring water waves in the new Deltares Delta Flume. *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, Vol. II-5/W2, 2013, pp. 271-276.
- SUSPERREGUI, A.S., GRATIOT, N., ESTEVES, M. & PRAT, C. A preliminary hydrosedimentary view of a highly turbid, tropical, manmade lake: Cointzio Reservoir (Michoacán, Mexico). *Lakes & Reservoirs: Research & Management*, Vol. 14, No. 1, 2009, pp. 31-39.
- TAMARI, S. & AGUILAR-CHÁVEZ, A. Probando nuevos transductores de presión sumergibles para monitorear el nivel del agua en tanques. *Tecnología y Ciencias del Agua*, Vol. 1, No. 3, 2010, pp. 71-88.
- TAMARI, S., LAPORTE-VERGNES, A. & SALGADO, G. Banco de prueba sencillo para verificar distanciómetros Láser de bolsillo. En: Galván-Hernández, C.A. (ed.), *Proc. Simposio de Metrología 2010*. Querétaro (Mexico): CENAM, 27-29 Octubre de 2010, 7 pp. (Artículo C17 en CD-ROM).
- TAMARI, S., MORY, J. & GUERRERO-MEZA V. Testing a near-infrared Lidar mounted with a large incidence angle to monitor the water level of turbid reservoirs. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, Vol. 66, No. 6 (Supplement), 2011, pp. S85-S91.
- TAMARI, S., GARCIA, F., ARCINIEGA-AMBROCIO, J.I. & PORTER, A. Testing a handheld radar to measure water velocity at the surface of channels. *La Houille blanche*, No. 3, 2014, pp. 30-36.

**La Asociación Mexicana de Hidráulica**

**Otorga la presente:**

# CONSTANCIA

**A: Serge Tamari Wagner, Vicente Guerrero Meza, Younès Rifad y Luis Bravo Inclán**

Por la presentación del artículo  
“Monitoreo del Tirante en Embalses Turbios  
con un Distanciómetro Láser Inclinado”,

Presentado en el XXIII Congreso Nacional de Hidráulica, realizado del  
15 al 17 de Octubre de 2014, en Puerto Vallarta, Jalisco.

**Presidente del Congreso:**

Ing. Raúl Antonio Iglesias Benítez

**Director Técnico:**

Dr. Víctor H. Alcocer Yamanaka

## **Anexo A.2**

**Artículo aceptado  
en una revista con comité de lectura**



# Testing a handheld radar to measure water velocity at the surface of channels

S. TAMARI<sup>1</sup>, F. GARCÍA<sup>2</sup>, J.I. ARCINIEGA-AMBROCIO<sup>3</sup>, A. PORTER<sup>4</sup>

<sup>1</sup> IMTA, Paseo Cuauhnáhuac 8532, Jiutepec Mor. 62550, Mexico. (tamari@tlaloc.imta.mx)

<sup>2</sup> ENGEES, 1 quai Koch, 67070 Strasbourg, France.

<sup>3</sup> ITCh, Av. José Francisco Ruíz Massieu 5, Chilpancingo Gro. 39090, Mexico.

<sup>4</sup> MECOPAA, Miguel Lerdo de Tejada 118, Col. Guadalupe Inn, México DF 01020, Mexico.

**ABSTRACT.** – Among the non-contact instruments to measure water velocity in open channels, two handheld radars are available on the market since ten years. Due to the lack of information about these instruments, one model was tested in the laboratory and in the field. The radar was able to estimate the velocity of a water surface within  $[p = 0.95] \pm 0.3$  m/s at medium velocities (from 0.3 to 3 m/s) and within  $\pm 10$  % of the measured value at large velocities (up to at least 6 m/s). Although this is not very accurate, the ease of using handheld radars still makes them attractive to quickly estimate discharge at gauging stations, safely determine water velocity during a flood and investigate how water flows under difficult access conditions. Nevertheless, the tested radar was tending to underestimate the water velocity, above all when it was looking downstream. More studies are necessary to know why.

Key-words: SVR (surface velocity radar), Doppler radar, microwave, water velocity, open channels, gauging.

## Evaluation d'un radar portable pour mesurer la vitesse de l'eau à la surface des canaux

**RÉSUMÉ.** – Parmi les instruments sans contact pour mesurer la vitesse de l'eau dans les canaux, deux radars portables sont disponibles sur le marché depuis une dizaine d'années. En raison du manque d'information sur ces instruments, l'un d'eux a été testé au laboratoire et sur le terrain. Le radar a permis d'estimer la vitesse à la surface de l'eau avec une incertitude  $[p = 0.95]$  de  $\pm 0.3$  m/s pour des vitesses moyennes (0.3 à 3 m/s) et  $\pm 10$  % de la valeur mesurée pour des vitesses plus élevées (jusqu'à au moins 6 m/s). Bien que ce ne soit pas très précis, la simplicité d'utilisation des radars portables les rend attractifs pour estimer rapidement le débit dans les stations de jaugeage, déterminer sans risque la vitesse de l'eau en cas de crue et savoir comment l'eau s'écoule dans des conditions difficiles d'accès. Néanmoins, le radar testé tendait à sous-estimer la vitesse de l'eau, surtout quand il pointait vers l'aval. Des études complémentaires sont nécessaires afin de savoir pourquoi.

Mots-clés : SVR, radar à effet Doppler, micro-ondes, vitesse de l'eau, canaux, jaugeage.

## I. INTRODUCTION

In Hydraulics, *current meters* are light instruments designed to measure the velocity of a small water volume ( $< 1$  dm<sup>3</sup>). They are useful in open channels to determine the discharge or investigate some certain hydrodynamic features. The most common instruments for field applications are [e.g. ISO 2007]: mechanical current meters (MCM), electromagnetic velocimeters (EMV) and acoustic Doppler velocimeters (ADV). Acoustic Doppler current profilers (ADCP) mounted on a floating platform can be used as well. When used properly, current meters can accurately determine water velocity: their uncertainty  $[p = 0.95]$  is better than  $\pm 0.01$  m/s for low velocities (below  $\approx 0.5$  m/s) and  $\pm 2$  % of the measured value for medium velocities (up to  $\approx 3$  m/s) [e.g. Hubbard *et al.* 2001; ISO 2007]. Nonetheless, they must be inserted into water, which can be time-consuming and dangerous.

There is therefore an interest in developing instruments that can measure water velocity in open channels with no need to submerge them. For field applications, the two main techniques are image velocimetry (LSPIV/STIV) [e.g. Le Coz *et al.* 2010] and Doppler radar (considered in this study). Unfortunately, none of these is still operational to

determine velocity below the water surface (*i.e.*, at a depth  $> 0.2$  m). In this case, it is worth noting that measuring the water velocity only at the free surface - instead of measuring it at different depths - is still considered a reliable - although less accurate- method to estimate discharge in open channels [e.g. ISO 2007; Le Coz *et al.* 2010; Dramais *et al.* 2014].

Among the non-contact instruments to determine velocity in open channels under field conditions, two handheld radars are available on the market since ten years. Although they look attractive for their rather low cost ( $< 4,500$  USD) and ease of use (Fig. 1), little is known about their performances. The goal of this study was therefore to test a handheld radar to determine the velocity at the surface of open channels.

## II. LITERATURE REVIEW

### II.1. What is known about the handheld radars ?

Handheld radars look like a pistol (for this reason, they are often called *radar gun*). They can be defined as *monostatic* (the receiving antenna is near the emitting antenna) and *microwave* (they emit a signal in the microwave range)

Doppler radar, designed to be easily transported by a walking person and operated from a steady position. Handheld radars were originally developed to determine the speed of cars. They have also become popular to determine the speed of animals and sporting balls. The idea of using similar instruments to determine water velocity in open channels was patented ten years ago [Smith *et al.* 2003]. There are currently two models of this type (called *surface velocity radar* by their manufacturers). Both look very similar for their shape and specifications; it is worth noting that their (3 dB) *beam width* is large in practice (12°) and that they emit a signal with a *circular polarization*.

Little has been published about the performances of handheld radars in the field of Hydraulics. First, the “SVR” model from Decatur Electronics [2011] has an operating frequency of 24 GHz (*K-band*). Its claimed uncertainty [ $p = 0.95$ ]<sup>1</sup> is  $\pm 10\%$  of the measurement for a range from 0.3 to 9 m/s. A few evaluations of this instrument [Song *et al.* 2006; Fulton & Ostrowski 2008; Zolezzi *et al.* 2011; Dramais *et al.* 2011, 2014] suggest that it can indeed estimate surface velocity within  $\pm 10\%$  for medium to large velocities ( $\approx 0.5 - 5$  m/s), but does not always operate at low velocities ( $< 0.5$  m/s). Second, the “Stalker Pro II SVR” model from Stalker Radar [2008] has an operating frequency of 35 GHz (*Ka-band*). Its claimed uncertainty [ $p = 0.95$ ] is  $\pm 0.2$  m/s for a range from 0.2 to 18 m/s. Compared to the previous radar model, its maximum operating velocity is therefore claimed to be larger (twice) and it is claimed to be more accurate at large velocities ( $> 2$  m/s). Until now, there is no publication about the performances of the “Stalker Pro II SVR” radar; this model will be considered below.

## II.2. Principle of operation of a handheld radar

A *radar* is a remote sensing system that sends an electromagnetic signal of a given frequency to a target and then measures some properties of the signal that is sent back (time delay, Doppler shift and/or intensity) in order to determine its distance, speed and/or texture.

As for any other fixed and monostatic Doppler radar, a handheld radar determines the velocity of a target by sending

a signal of a given frequency ( $f_0$ , Hz) to the target, retrieving the backscattered signal and determining its frequency ( $f$ , Hz). The *Doppler effect* is used by the instrument to internally compute the *radial velocity* of the target, that is, the component of its velocity relative to the radar’s line-of-sight ( $V_r$ , m/s):

$$V_r = -\frac{c_a}{2} \frac{\Delta f}{f_0} \quad (1)$$

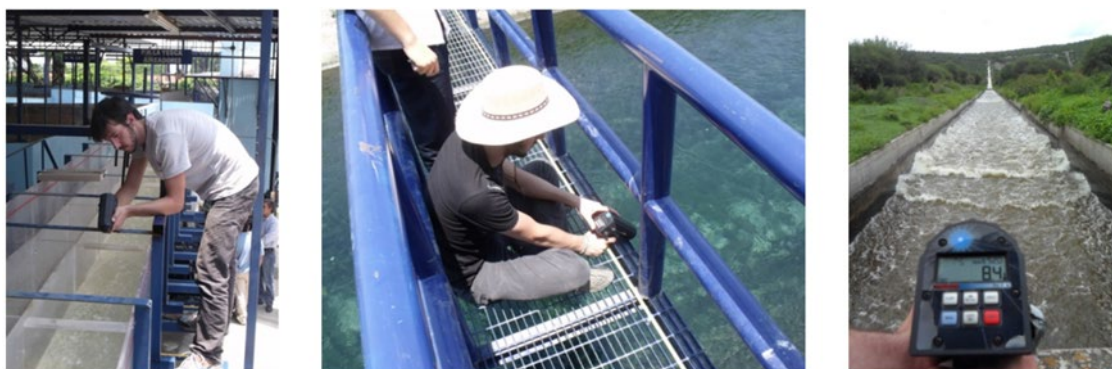
where  $c_a$  is the speed of light through the air ( $\approx 3 \times 10^8$  m/s) and  $\Delta f = f_0 - f$  is the *Doppler shift* (negative when the target gets closer and positive when it goes away). So, unless the radar is placed exactly in front of a moving target, a trigonometric correction must be applied to estimate the velocity of the target in its main direction of movement. Consider a radar oriented in such a way (e.g. from a bridge) so that it looks in the main direction of a stream. Provided that the radar signal is backscattered (as discussed in Section II.4) and assuming that it is emitted as a narrow beam (as discussed in Tamari *et al.* 2013), the velocity of the water surface ( $V_s$ , m/s) can be estimated as:

$$V_s = \frac{V_r}{\sin \theta} \quad (2)$$

where  $V_r$  (m/s) is the radial velocity of the water surface and  $\theta$  (°) is the radar’s incidence-angle relative to the water surface. At the scale of several metres, it can be usually assumed that the water surface of open channels is a horizontal plane: this is realistic (with a tolerance of  $\pm 1^\circ$ ) provided that the channel slope is gentle ( $< 0.017$  m/m) and that there is no hydraulic jump. In this case, the angle  $\theta$  of Eq. 2 is simply the *incidence angle* of the radar ( $\theta_0$ ), i.e. the angle between its line-of-sight and the vertical. Commercial handheld Doppler radars have a built-in inclinometer, so that they can automatically determine such an angle and use it to estimate the velocity of a horizontal water surface.

Next, the case of a plane but inclined water surface will be also considered. This situation occurs in steep artificial channels and in the middle part of some spillways. In this case, the angle of Eq. 2 is:  $\theta = \theta_0 - \beta$  for a radar looking upstream, and  $\theta = \theta_0 + \beta$  for a radar looking downstream, where  $\beta$  is the slope of the water surface ( $0 \leq \beta < 90^\circ$ ). In practice, the water surface is often almost parallel to the channel bottom and edges, which can be easily checked visually. If so, the

1. In the following, any uncertainty that is reported by a manufacturer without specifying its confidence interval is assumed to be a standard uncertainty [ $p = 0.68$ ]. In this case, we report a twice larger uncertainty, considering a 95 % level of confidence [ $p = 0.95$ ].



**Fig. 1:** Different types of sites where the radar was tested: (left) laboratory spillway, (middle) irrigation channel and (right) rapid with rolling waves.

angle  $\beta$  can be rapidly estimated by measuring the channel's slope with the built-in inclinometer of a handheld radar or any other inclinometer. Nevertheless, it becomes more difficult to determine the angle  $\beta$  when the water surface is curved; such a situation is out of the scope of this study.

### II.3. Which incidence angle for the radar ?

To reduce the effect of the trigonometric correction (Eq. 2) as much as possible, a radar should be placed so that it looks at the water surface with a relative incidence angle as large as possible. Nonetheless, when a handheld radar looking at a water surface is oriented with a too large incidence angle, it becomes difficult in practice to know at what it is pointing. During this study, no attempt was made to use the handheld radar with a relative incidence angle larger than  $70^\circ$ . Assuming that  $V_r$  and  $\theta$  are normally-distributed and independent random variables, a simple model to estimate the uncertainty of  $V_s$  can be derived from Eq. 2:

$$U(V_s) = \sqrt{\frac{1}{\sin^2 \theta} U^2(V_r) + \frac{V_s^2}{\tan^2 \theta} U^2(\theta)} \quad (3)$$

where  $U(\bullet)$  denotes the uncertainty of each variable (at a given confidence level); please note that the term  $U(\theta)$  must be expressed in radians. Strictly speaking, the model does not agree with what is claimed by the manufacturers of handheld radars (Section II.1); in fact, it predicts that the uncertainty of the surface velocity ( $U(V_s)$ ) is neither a constant value nor a fixed proportion of the measured value. In the case of the studied radar, assuming that its claimed uncertainty is for the radial velocity:  $U(V_r) = 0.2$  m/s [ $p = 0.95$ ] and considering that the claimed uncertainty of its built-in inclinometer is:  $U(\theta) = 0.07$  rad ( $4^\circ$ ) [ $p = 0.95$ ], the expected uncertainty  $U(V_s)$  can be computed using Eq. 3 for different scenarios (different values of  $V_s$  and  $\theta$ ). The results suggest that the radar should be oriented with an incidence angle  $\theta > 45^\circ$ , otherwise its uncertainty will rapidly increase (for more details, see Tamari *et al.* 2013).

### II.4. Detection of a water surface by a microwave radar

To be able to determine the velocity of a water surface, a Doppler radar must first detect it: the signal sent by the instrument must be reflected by the water in such a way that it goes back to the instrument and can be processed. This phenomenon has been studied for 50 years in the laboratory and on the sea. Considering that the handheld radar emits microwaves, the backscattering of its signal by water (at least, for  $20 \leq \theta \leq 70^\circ$ ) is currently described by the *Bragg / composite surface* theory [e.g. Plant and Keller 1990; Plant *et al.* 2004]. On the one hand, the theory considers that the microwaves are mostly backscattered by small water waves (traveling nearly in the plane of incidence, either toward the radar, either away from it), *i.e.* ripples with a wavelength  $\Lambda_b \approx 6$  mm in the case of the studied radar (according to the *Bragg resonant condition*). In open channels, these ripples can be produced by external factors (the wind and the rain) and internal factors (the distortion of larger waves and the turbulence of water). On the other hand, the theory considers that the ripples backscattering the radar signal are mostly driven by larger water waves. In open channels, these larger waves (gravity-capillary waves and hydraulic boils) are due to the wind

and turbulence of water. On average, they are assumed to move at the velocity of the water surface.

The above theory predicts that the tested radar will not work if there are virtually no ripples on a water surface, as it may occur under low water flow and clear weather conditions [e.g. Plant *et al.* 2005] or if there is an oil film on the water [e.g. Gade *et al.* 1998]. It also predicts that the raw data recorded by a radar (a time-series of Doppler shifts) are "noisy". The main reason for that is that each water wave (ripples and larger waves) tends to propagate in several directions. So, a radar should detect water waves that sometimes move faster than the average water surface (*advancing waves*) and that sometimes move slower (*receding waves*). Ideally, the histogram of the raw data recorded by the radar (converted into surface velocities, according to Eqs. 1-2) should have two peaks: one corresponding to  $(V_s + c_b)$  and the other corresponding to  $(V_s - c_b)$ , where  $c_b$  is the *phase speed* of the water waves that backscatter the radar signal. If so, processing the raw radar data simply consists in extracting the midway point between the two peaks. However, it is often difficult to discern this theoretical couple of peaks when working with a microwave radar. In this case, processing the raw radar data is not straightforward anymore. If data are not processed carefully, the estimated surface velocity ( $V_s$ ) can be erroneous up to about  $\pm c_b$  [Plant *et al.* 2005]. For the studied radar,  $c_b \approx 0.3$  m/s [Tamari *et al.* 2013]; it is worth noting that the minimum expected uncertainty of the radar (computed from Eq. 3 with  $\theta = 45^\circ$ ) is close to this value.

### II.5. Difficulty in interpreting the velocity measured by a radar

Assuming that the data have been averaged over a sufficiently long period of time, the surface velocity determined by a Doppler radar ( $V_s$ ) can be decomposed as an algebraic sum of four terms:

$$V_s = V + W + U_s + v \quad (4)$$

where  $V$  is the drift caused by the underlying current (m/s),  $W$  is the drift caused by the wind blowing in the direction of the radar's line-of-sight (m/s),  $U_s$  is the Stokes drift (m/s) and  $v$  is an eventual bias due to the way a radar "sees" a water surface (m/s). Considering the goal in Hydraulics is to determine the underlying current ( $V$ ), taking it to be equal to the surface velocity measured by a radar ( $V_s$ ) may lead to three types of systematic errors:

- *Wind effect (W)* - During this study, the handheld radar was tested under low wind conditions, at most equivalent to a *gentle breeze* on the Beaufort scale. In this case, the wind effect was expected to be rather small ( $W < 0.1$  m/s) [Tamari *et al.* 2013].
- *Stokes drift (U<sub>s</sub>)* - The Stokes drift is accounted for by a Doppler radar (as well as by small surface drifters), but not by a conventional current meter that would be maintained at a fixed position and just below the water surface. Nevertheless, the Stokes drift was expected to be rather small for the studied channels ( $U_s < 0.14$  m/s) [Tamari *et al.* 2013].
- *Bias term due to the radar (v)* - Due to the specific motion of the water waves that backscatter the radar signal, there may be a systematic difference ( $v \neq 0$ ) between the surface velocity determined by a Doppler radar and the true surface velocity for a number of reasons; this will be discussed further below (Section IV).

## II.6. Experience with microwave radars in open channels

As shown, it is not so simple to use a radar to estimate the velocity of a water surface. In this context, microwave radars with different configurations have been tested over open channels over the last fifteen years. Above all, prototypes [Plant *et al.* 2005; Costa *et al.* 2006; Fulton & Ostrowski 2008] and commercial instruments [Song *et al.* 2006; Dramais *et al.* 2011, 2014; Sung-Kee *et al.* 2012] fixed to a bridge (radars looking in the direction of the main stream) have been tested. Prototypes [Plant *et al.* 2005; Costa *et al.* 2006] and commercial instruments [Sung-Kee *et al.* 2012] located at a channel bank have been also tested. Prototypes moved across a channel using a cableway or a helicopter have been tested as well [Plant *et al.* 2005]. It is worth noting that a radar with an operating frequency of 10 GHz (*X-band*) and a design very similar to that of the commercial handheld radars has been described and tested by Lee & Julien [2006]; nonetheless, it seems to have been forgotten for an unknown reason. All the mentioned field testing suggest that microwave radar can usually determine the surface velocity of open channels with an uncertainty [ $p = 0.95$ ] of  $\pm 0.2$  m/s, which is consistent with that claimed by the manufacturers of handheld radars. Nevertheless, testing have been conducted in rivers but not in artificial channels (where the roughness of the water surface may be different) and only for water velocities  $\leq 5$  m/s.

## III. MATERIALS AND METHODS

### III.1. Sites where the radar was tested

Based on the literature review, it was decided to test the handheld radar over a series of open channels:

- *Wide range of water velocities* - The radar was tested for the widest range of velocities as possible, *i.e.* from 0.3 to at least 6 m/s. To achieve this range, tests were performed not only over horizontal channels, but also over the plane part of inclined channels (slope as large as 28°). It was not sure whether the radar would work under clear weather conditions at low velocities ( $< 0.5$  m/s), and the comparison with conventional current meters was quite challenging at large velocities ( $> 3$  m/s).
- *Several types of open channels and flow conditions* - Compared to other radars designed to study open channels, the handheld radar can be very easily transported from one site to another, which makes it possible to rapidly test this instrument under several flow conditions. For this study, 18 sites were chosen for testing, with a special interest in artificial channels. The testing was performed in straight portions of narrow (*aspect ratio*  $v$  as low as 1) and wide ( $v$  as large as 40) channels, with different wall roughness (walls made of glass, acrylic, cement, concrete or earth and stones). Both subcritical (*Froude number*  $Fr$  as low as 0.2) and supercritical ( $Fr$  as high as 5) flow conditions were considered.
- *Clear weather conditions* - The radar was tested in the laboratory (13 sites) and in the field (5 sites). In the field, testing was made under low wind (not more than a gentle breeze) and no rain conditions. Although these conditions are convenient for the user and should ensure that the water surface is mostly driven by the underlying current, they are known to be challenging for the radar when water flows slowly. The water surface may indeed be too smooth to produce a significant backscattering of the radar signal [Plant *et al.* 2005].

- *No oil at the water surface* - The radar was tested over channels with clear, turbid and very turbid water, but *not* in channels contaminated by gasoline or detergent, where the presence of an oil film could prevent the radar from detecting the water surface [*e.g.* Gade *et al.* 1998].

### III.2. Conditions for using the tested radar

The only parameter for configuring the tested radar was its “power output”, which was set at 20 mW (as recommended by the manufacturer for taking data close to a water surface). After that, taking a measurement with the tested radar was easy: once oriented in the main direction of a stream, its built-in inclinometer was used to incline the radar to a desired incidence angle ( $\theta_0 = 90^\circ - \phi_0$ , where  $\phi_0$  is the *grazing angle* that was actually displayed by the radar); the radar was then maintained in the same position and its trigger was pressed. About 30 s later, the radar was usually displaying a symbol saying whether water was moving forward or downward and an average velocity data ( $V_s^*$ ); because the radar has been designed to be used over horizontal channels, this data is a projection in an horizontal plane of the determined radial-velocity ( $V_r = V_s^* \times \sin \theta_0$ ). During testing, the radar was operated as follows:

- *Radar oriented in the main-stream direction* - The radar was always oriented in the main-stream direction. So, field testing was made from bridges of gauging stations. No attempt was made to use the radar from a channel edge; in this case, there was no need to correct the radar data for the azimuthal angle relative to the channel direction (as done by Lee & Julien 2006) and there was no concern with secondary or cross currents (as discussed by Plant *et al.* 2005).
- *Radar looking upstream / downstream* - Each time, a measurement was taken with the radar looking upstream and another with the radar looking downstream. In the laboratory, special attention was paid to locate the radar so that it was pointing at the same part of a channel. While this was not possible in the field, the studied channels were long and uniform enough to reasonably assume that the transversal velocity-profile was the same along the section where the measurements were taken.
- *Radar located as close as possible to the water surface* - As a first approximation, the tested radar should “see” an area at the water surface (*footprint*), which is an ellipse with a transversal diameter:  $D_r \approx 0.2 \times L$ , where  $L$  (m) is the distance to the surface in the line-of-sight direction [Tamari *et al.* 2013]. It must be recognized that this relation applies only if the distance  $L$  is larger than a certain value, which is:  $L_f = 0.6$  m for the studied radar (according to the *far field condition*). In the field, the radar was located at  $3 \leq L \leq 10$  m, resulting in  $0.6 \leq D_r \leq 2$  m. In the laboratory, it was empirically located at  $0.1 \leq L \leq 0.3$  m; this is smaller than  $L_f$ , resulting in  $D_r < 0.12$  m. Thus, it was felt that the area sampled by the radar was not too large, so that the radar data could be used on channels with a width  $b \geq 0.3$  m and so that its data could be compared to the data provided by current meters.
- *Measurements taken rather quickly* - Once a first value for the average velocity was displayed by the radar, the instrument was left to take more data and average them during  $\approx 20 - 40$  s. This duration was usually sufficient to achieve repeatable data with a tolerance of  $\pm 0.15$  m/s.
- *Intermediate incidence angle* - Based on the results of a preliminary testing [Tamari *et al.* 2013], the radar was used with its handle downward and a relative incidence angle ( $\theta$ ) between 45 to 50° for moderately inclined channels (slope  $\beta \leq 10^\circ$ ) and between 50 to 60° for steeper channels.



• *Radar's inclinometer considered as unbiased* - The radar's built-in inclinometer has a claimed uncertainty [ $p = 0.95$ ] of  $\pm 4^\circ$ . This was checked in the laboratory against a comparison with an external inclinometer with a tolerance  $< 1^\circ$  (model "MTi", Xsens Technologies, Enschede, The Netherlands). Although systematic differences were found, their magnitude was always  $< 2.6^\circ$  (Fig. 2).

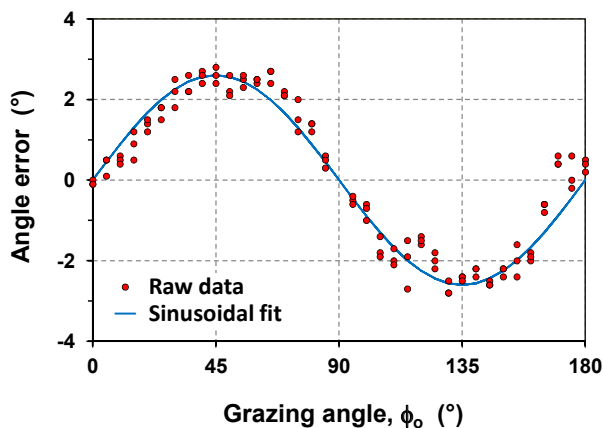
### III.3. Reference techniques for testing the radar

Most of the radar testing was conducted taking an ADV (model "FlowTracker", Sontek/YSI) as the reference at low to medium velocities ( $< 2.5$  m/s) and a Pitot tube (model "630", Lambrecht) as the reference at larger velocities. To estimate the surface velocity in open channels, these meters were located as close as possible to the water surface (sensor top at  $\approx 2$  cm below the surface), with special care to avoid cavitation around them during the measurements. The ADV was expected to be several times more accurate than the studied radar at low to medium water velocities, whereas the Pitot tube was expected to be much more accurate at large velocities [Tamari *et al.* 2013]. In addition, an MCM (model "Price AA", Rossbach) was taken as the reference for testing the radar in a river and a simple PIV technique was used as the reference in a field channel where water was flowing very rapidly [Tamari *et al.* 2013].

## IV. RESULTS AND DISCUSSION

### IV.1. Global performances of the tested radar

When tested in the laboratory and looking upstream, the handheld radar was found (Fig. 3) to estimate water velocity at the surface of open channels from 0.3 to 6 m/s with an uncertainty slightly better [ $p > 0.95$ ] than what was expected at the beginning of this study (Section II.3); please note that the uncertainty of the reference techniques has been neglected because it was *a priori* several times lower than that of the radar. Roughly, it corresponds to:  $U(V_s) \approx 0.3$  m/s at medium velocities (from 0.3 to 3 m/s) and  $U(V_s) \approx 0.1 \times V_s$  at large velocities. Such an uncertainty is similar to that previously reported for the other model of handheld radar



**Fig. 2:** Laboratory verification of the radar's built-in inclinometer. The error is the difference between the angle displayed by the radar and the actual angle. Please, note that the radar displays the grazing angle ( $\phi_0$ ), i.e. the angle between its line-of-sight and the horizontal.

(Section II.1) and slightly larger than that previously reported for other types of microwave Doppler radars that have been tested in rivers (Section II.6).

When tested in the laboratory and looking downstream, the radar was found to estimate water velocity with an uncertainty still [ $p = 0.95$ ] consistent with what was expected at the beginning. It could be argued that the laboratory results underestimate the usual performances of the radar, because it has been tested very close to the water surface (Section III.2). However, the radar data obtained in the field were consistent with those obtained in the laboratory (Fig. 3).

### IV.2. Underestimation of the reference velocities

Although the performances of the tested radar were consistent with what was expected at the beginning, two biases were found during this study. This will be discussed in this section and in the next one. According to a regression analysis, the radar data were significantly different from the reference data: on the average, the radar data were lower by  $\approx 5\%$  of the value when the radar was looking upstream, and lower by  $\approx 8\%$  of the value when the radar was looking downstream. This trend is still unexplained:

- *A bias of the radar's inclinometer ?* - Contrary to what has been reported for the other commercial model of handheld radar [Dramais *et al.* 2014], the trend cannot be explained by the bias of the radar's inclinometer: in a preliminary attempt to correct for this bias (Fig. 2), no significant improvement of the radar's performances was obtained.

- *A bad choice of the reference techniques ?* - It could be argued that the current meters used as a reference for testing the radar (Section III.3) may have underestimated the velocity at the surface of narrow (*i.e.* aspect ratio  $< 5$ ) and rectangular channels, due to the *dip phenomenon*. However, the radar was also tested in the central part of wide rectangular channels and of trapezoidal channels, where the dip phenomenon should not occur [Tominaga *et al.* 1989].

### IV.3. Radar looking downstream vs. looking upstream

The radar was found to usually estimate a lower velocity when looking downstream ( $V_s^{down}$ ) instead of upstream ( $V_s^{up}$ ). Roughly, the velocity difference ( $\Delta V_s = V_s^{up} - V_s^{down}$ ) was increasing as a function of water velocity, when it was larger than  $\approx 1$  m/s (Fig. 4). No clear trend was found in  $V_s$  as a function of other quantitative (Froude number, aspect ratio, channel slope) or qualitative (laboratory or field testing) variables. It is still difficult to know why:

- *A wind effect ?* - The histogram of the raw data recorded by a microwave Doppler radar (converted into surface velocities) is often skewed. Many studies performed in water tanks [*e.g.* Gade *et al.* 1998; Plant *et al.* 2004] and on the sea [*e.g.* Plant and Keller 1990] have shown that this can be due to the wind (even a light air, with a speed as low as  $\approx 0.3$  m/s), unless it is blowing perpendicularly to the radar's line-of-sight. If a radar is looking upwind, it should record a histogram with a larger peak corresponding to the advancing water waves ( $V_s + c_b$ ). On the opposite, if the radar is looking downwind, it should record a histogram with a larger peak corresponding to the receding waves ( $V_s - c_b$ ). Under those circumstances, if the radar does not process carefully the raw data (*i.e.* if it does not extract the midway point between the two theoretical peaks of the histogram, but computes an average value, or -even worse- takes the mode), the absolute value of  $\Delta V_s$  could be as large as  $\approx 2 \times c_b$ , which is  $\approx 0.6$  m/s for the studied radar (Section II.4). Since

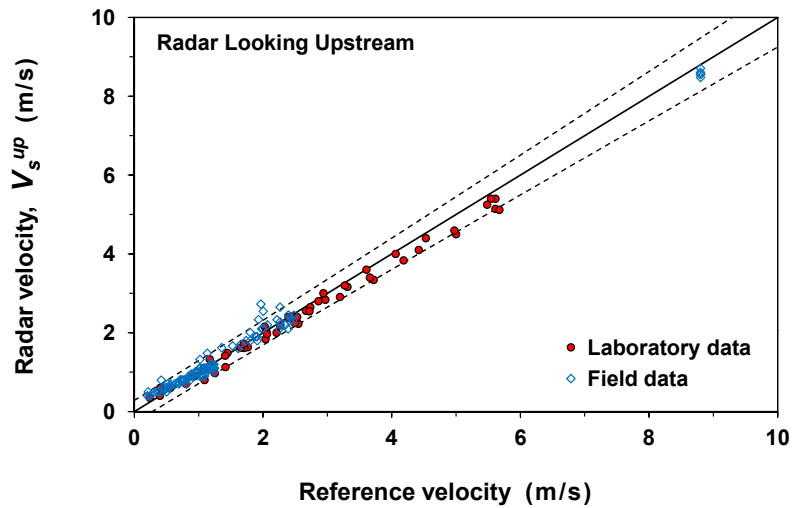


Fig. 3: Velocity measured by the radar looking upstream ( $V_s^{up}$ ) vs. velocity measured by reference techniques. The dashed lines show the expected radar uncertainty [ $p = 0.95$ ].

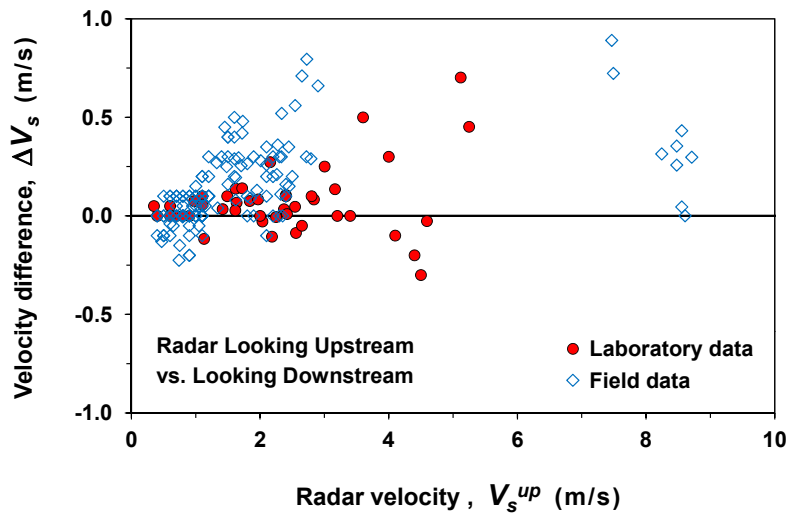


Fig. 4: Difference in velocity between the radar looking upstream and downstream ( $\Delta V_s$ ) as a function of the velocity measured by the radar looking upstream ( $V_s^{up}$ ).

most of the observed values of  $\Delta V_s$  were within  $\pm 0.6$  m/s (Fig. 4), they could be due to a wind effect and to an inaccurate data processing.

• *An hydrodynamic effect ?* - If the observed values of  $\Delta V_s$  were due to the wind, the fact that they were usually positive would mean that the wind was usually blowing from upstream in the studied channels. Although, the wind direction and speed have not been systematically measured during this study, it seems that the observed values of  $\Delta V_s$  were not always due to the wind: in the field, larger values of  $\Delta V_s$  were obtained in some specific parts of channels where the water surface was more irregular due to turbulence, even under a light air condition or a light breeze coming from downstream [Tamari *et al.* 2013]. More studies are necessary to know if this is a general feature of microwave Doppler radars when used in open channels under clear weather conditions or an imperfection of the studied radar (unfortunately, its data processing algorithm is a “black box”).

## V. CONCLUSION

Over the last fifteen years, a growing number of studies have shown that Doppler radar technology is a promising tool to estimate water velocity at the surface of open channels. In this context, a commercial handheld radar was tested. The testing covered a broad range of velocities (from 0.3 to at least 6 m/s) and channel types (including inclined channels). The radar was able to estimate the water velocity within  $[p = 0.95] \pm 0.3$  m/s at medium velocities (from 0.3 to 3 m/s) and  $\pm 10\%$  of the measured value at large velocities. Although this is not very accurate, the ease of using handheld radars still makes them attractive to quickly estimate discharge at gauging stations and to investigate how water flows under difficult access conditions. Nonetheless, the tested radar was tending to underestimate the water velocity, above all when it was looking downstream. More studies are necessary to know if this is due to a wind effect and an

imperfection of the tested radar or if this is a general feature of microwave Doppler radars when used in open channels under clear weather conditions. Meanwhile, it is a good precaution to compare - whenever possible - the velocities obtained with a radar looking upstream and downstream.

## VI. ACKNOWLEDGMENTS

This paper is a short version of a small book edited by the Mexican Institute of Water Technology (IMTA). Thank you to Bertrand Chapron (IFREMER) and to two anonymous reviewers for their comments about an earlier version of the paper.

## VII. REFERENCES

- CHAPRON B., COLLARD F., ARDHUIN F. (2005) — Direct measurements of ocean surface velocity from space: Interpretation and validation. *J. Geophysical Res.* **110** C07008
- COSTA J.E., CHENG R.T., HAENI F.P., MELCHER N., SPICER K.R., HAYES E., PLANT W., HAYES K., TEAGUE C., BARRICK D. (2006) — Use of radars to monitor stream discharge by noncontact methods. *Water Resour. Res.* **42** W07422
- DECATUR ELECTRONICS (2011) — SVR (Surface Velocity Radar) - User's Manual (Rev. 02/08/2011). *Decatur Electronics Europe Inc., Kokkola (Finland)*. 45 p
- DRAMAIS G., LE COZ J., GALLAVARDIN A., DUBY P., HAUET A., LARONNE J. (2011) — Mesures sans contact des débits de crue : avancées et perspectives. In: *Mono M.O. (ed.), Proc. "ECOTECHS' 2011 (CEMAGREF)", Montoldre (France), October 17-18 2011*
- DRAMAIS G., LE COZ J., LE BOURSICAUD R., HAUET A., LAGOUY M. (2014) — Jaugeage para radar mobile: protocole et résultats. *La Houille Blanche*. **3** 23-29
- FULTON J., OSTROWSKI J. (2008) — Measuring real-time streamflow using emerging technologies: radar, hydroacoustics, and the probability concept. *J. Hydrol.* **357** (1-2) 1-10
- GADE M., ALPERS W., ERMAKOV S.A., HUEHNERFUSS H., LANGE P.A. (1998) — Wind wave tank measurements of bound and freely propagating short gravity-capillary waves. *J. Geophys. Res.* **103** 21697-21710
- HUBBARD E.F., SCHWARZ G.E., THIBODEAUX K.G., TURCIOS L.M. (2001) — *Price current-meter standard rating development by the U.S. Geological Survey*. *J. Hydraul. Eng.* **127** (4) : 250-257
- ISO (2007) — Hydrometry - Measurement of liquid flow in open channels using current-meters or floats (ISO 748: 2007). *International Organization for Standardization (ISO), Genève*
- LE COZ J., HAUET A., DRAMAIS G., PIERREFEU G. (2010) — Performance of image-based velocimetry (LSPIV) applied to flash-flood discharge measurements in Mediterranean rivers. *J. Hydrol.* **394** (1-2) 42-52
- LEE J.S., JULIEN P.Y. (2006) — Electromagnetic wave surface velocimetry. *J. Hydraul. Eng.* **132** (2) 146-153
- PLANT W. J., KELLER W.C. (1990) — Evidence of Bragg scattering in microwave Doppler spectra of sea return. *J. Geophys. Res.* **95** (C9) 16299-16310
- PLANT W.J., DAHL P.H., GIOVANANGELI J.P., BRANGER H. (2004) — Bound and free surface waves in a large wind-wave tank. *J. Geophys. Res.* **109** (C10) C10002
- PLANT W.J., KELLER W.C., HAYES K. (2005) — Measurement of river surface currents with coherent microwave systems. *IEEE Trans. Geosci. and Remote Sensing*. **43** 1242-1257
- SMITH K.J., JANSON S.D., SMITH K.T. (2003) — Radar device for measuring water surface velocity. *US Patent 2003/0058158*
- SONG H.S., ZHANG L.Z., LIU W. (2006) — Comparing test and analysis on flow velocity measurement with handheld radar current meter. [Chinese]. *Automation in Water Resources and Hydrology*. **1** 30-32
- STALKER RADAR (2008) — Stalker Pro II SVR - Operator Manual (document 011-0098-00 Rev. C). *Stalker Radar / Applied Concepts Inc., Plano (TX)*. 23 p
- SUNG-KEE Y., DONG-SU K., KWON-KYU Y., MEYONG-SU K., WOO-YUL J., JUN-HO L., YONG-SEOK K., HO-JUN Y. (2012) — Comparison of flood discharge and velocity measurements in a mountain stream using electromagnetic wave and surface image. [Korean] [doi: 10.5322/JES.2012.21.6.739]. *J. Environ. Sci.* **21** (6) 739-747
- TAMARI S., GARCIA F., ARCINIEGA-AMBROCIO J.I., PORTER A. (2013) — Laboratory and field testing of a handheld radar to measure the water velocity at the surface of open channels. *Jiutepec, Mor. (Mexico): IMTA. [ISBN 978-607-7563-80-8]*
- TOMINAGA A., NEZU I., EZAKI K., NAKAGAWA H. (1989) — Three-dimensional turbulent structure in straight open channel flows. *J. Hydraul. Res.* **27** (1) 149-173
- ZOLEZZI G., ZAMLER D., LARONNE J.B., SALVARO M., PIAZZA F., LE COZ J., WELBER M., DRAMAIS G. (2011) — A systematic test of surface velocity radar (SVR) to improve flood discharge prediction (Poster H511-1332). *AGU Fall Meeting*, San Francisco (CA), December 5-9 2011. [only the abstract is available]



## **Anexo A.3**

### **Dos certificados de registro de *software***



# CERTIFICADO

## Registro Público del Derecho de Autor

Para los efectos de los artículos 13, 162, 163 fracción I, 164 fracción I, 168, 169, 209 fracción III y demás relativos de la Ley Federal del Derecho de Autor, se hace constar que la **OBRA** cuyas especificaciones aparecen a continuación, ha quedado inscrita en el Registro Público del Derecho de Autor, con los siguientes datos:

**AUTOR:** TAMARI WAGNER SERGE LEONARD  
**TITULO:** CLIC: SOFTWARE PARA DETERMINAR LAS FUGAS DE AGUA EN EDIFICIOS CON TINACO  
**RAMA:** PROGRAMAS DE COMPUTACION  
**TITULAR:** INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGIA DEL AGUA (CON FUNDAMENTO EN EL ARTICULO 83 DE LA L.F.D.A.)

Con fundamento en lo establecido por el artículo 168 de la Ley Federal del Derecho de Autor, las inscripciones en el registro establecen la presunción de ser ciertos los hechos y actos que en ellas consten, salvo prueba en contrario. Toda inscripción deja a salvo los derechos de terceros. Si surge controversia, los efectos de la inscripción quedarán suspendidos en tanto se pronuncie resolución firme por autoridad competente.

**Número de Registro:** 03-2014-011712482500-01

México D.F., a 23 de enero de 2014

EL DIRECTOR DEL REGISTRO PÚBLICO DEL DERECHO DE AUTOR

JESUS PARETS GOMEZ



SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA  
INSTITUTO NACIONAL  
DEL DERECHO DE AUTOR  
REGISTRO PÚBLICO





# CERTIFICADO

## Registro Público del Derecho de Autor

Para los efectos de los artículos 13, 162, 163 fracción I, 164 fracción I, 168, 169, 209 fracción III y demás relativos de la Ley Federal del Derecho de Autor, se hace constar que la **OBRA** cuyas especificaciones aparecen a continuación, ha quedado inscrita en el Registro Público del Derecho de Autor, con los siguientes datos:

**AUTOR:** TAMARI WAGNER SERGE LEONARD  
**TITULO:** CVPIC: A CODE TO COMPUTE THE THEORICAL UNCERTAINTY OF A  
CONSTANT VOLUMEN GAS PYCNOMETER  
**RAMA:** PROGRAMAS DE COMPUTACION  
**TITULAR:** INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGIA DEL AGUA (CON FUNDAMENTO EN  
EL ARTICULO 83 DE LA L.F.D.A.)

Con fundamento en lo establecido por el artículo 168 de la Ley Federal del Derecho de Autor, las inscripciones en el registro establecen la presunción de ser ciertos los hechos y actos que en ellas consten, salvo prueba en contrario. Toda inscripción deja a salvo los derechos de terceros. Si surge controversia, los efectos de la inscripción quedarán suspendidos en tanto se pronuncie resolución firme por autoridad competente.

Número de Registro: 03-2014-011712494700-01

México D.F., a 23 de enero de 2014

EL DIRECTOR DEL REGISTRO PÚBLICO DEL DERECHO DE AUTOR

JESUS PARETS GOMEZ



SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA  
INSTITUTO NACIONAL  
DEL DERECHO DE AUTOR  
REGISTRO PÚBLICO

SEP

SECRETARÍA DE  
EDUCACIÓN PÚBLICA



INDAUTOR  
Instituto Nacional del Derecho de Autor



**Anexo B.1**

**Anexo fotográfico**



# LIDAR instalado en el embalse de "Cointzio" (Mich.)



Lidar instalado en "Cointzio" (Mich.)



Escala para leer el tirante en "Cointzio" (Mich.)



Mancha de lirio acuático (Feb. 2014)



Embalse sin lirio y vertiendo (Oct. 2014)



## LIDAR instalado en el embalse de "Valsequillo" (Pue.)



Obra de toma de la Presa "Valsequillo"



Lidar instalado en "Valsequillo" (Pue.)



Escala para leer el tirante en "Valsequillo"



Embalse vertiendo (Junio 2014)



Primer estudio limnológico (Nov. 2014)



Sonda para el estudio limnológico





## **Anexo B.2**

**Código fuente para procesar  
los datos de un Lidar**



Lili.m

```
%=====
%
% Program:      Lili.m
%
% Objetivo:    Programa que lee los datos de monitoreo con Lidar
%              y los procesa (prueba en 'Cointzi o' y 'Valsequillo')
%
% Autor:       Serge,      04/06/2014
%              Serge,      28/08/2014
%
% Funciones:   'Filst.m'   = Function to remove periods of missing data
%              'Fild.m'   = Function para promediar datos por dia
%              'statis.m' = Function to compute percentiles
%              'esfig.m'  = Function para mejorar los grafos
%=====
```

```
%=====
%
% MENU PRINCIPAL PARA SELECCIONAR LOS CASOS
%=====
```

```
di sp(' ')
di sp(' ')
di sp(' ')
di sp(' *****' )
di sp(' *' )
di sp(' *          PRUEBA CON LIDAR < S200 >          *' )
di sp(' *          (c) Serge, 2014          *' )
di sp(' *          *' )
di sp(' *****' )
```

```
di sp(' ')
di sp([' Fecha de los calculos : ' date ])
```

```
% Select the studied case
% =====
```

```
di sp(' ')
di sp(' SELECTION OF LAKE ' )
di sp(' [0] Monitoreo en Valsequillo ')
di sp(' [1] Monitoreo en Cointzi o ')

ncase = input(' No prueba deseada -> ');
di sp(' ')
```

```
% Select the Lidar mode to detect water
% =====
```

```
di sp(' ')
di sp(' SELECTION OF MODE TO DETECT WATER ' )
di sp(' [1] First pulse ')
di sp(' [2] Strong pulse ')
di sp(' [3] Last pulse ')

nmode = input(' Modo deseado -> ');
```

```

disp(' ')

if ( nmode > 3 )
    error(' FATAL - Select <nmode> ')
end

% Select the quality of plots
% =====

disp(' ')
disp(' SELECT PLOT QUALITY ')
disp(' ')
disp(' [0] Basic graph')
disp(' [1] Advanced graph')

kfig = input(' Choice -> ');
disp(' ')

if ( kfig > 1 )
    error(' FATAL - Select <kfig> ')
end

%=====
%
% LAKE PARAMETERS
%
%=====

if (ncase == 0)
% -----
disp(' Lugar      : Valsequillo ')
disp(' Start       : 10-May-2012 ')
disp(' 2nd calib   : 25-Apr-2014 ')
disp(' ')

% Read and rename data files

eval(['load ' 'vadat.dat' ' -ascii']) % Carga datos del LIDAR
eval(['load ' 'varef.dat' ' -ascii']) % Carga datos de referencia
eval(['load ' 'vasec.dat' ' -ascii']) % Carga datos de Secchi

dataid   = vadat       ;
dataref  = varef       ;
datasec  = vasec       ;

% Name of the lake

Lake = 'Valsequillo' ;

% Calibration factors

HO      = 2065.6116    ; % Datum (msnm)
CosTeta = 0.47149     ; % Cos( Teta)

% Periods with missing data (begin / end) <<<<<< <<<<<

```

```

                                Lili.m
Dlost = [ [ 2012 01 01 0 00 00 ]' , [ 2012 05 10 0 00 00 ]' ...
          [ 2012 11 04 0 00 00 ]' , [ 2012 11 16 0 00 00 ]' ...
          [ 2013 04 25 0 00 00 ]' , [ 2014 01 21 0 00 00 ]' ]' ;

```

```
% Axis limits for plots
```

```
% Axis "Time (d)"
```

```
xmin = 0 ;
xmax = 1095 ;
```

```
xmax = 900
```

```
del t = 365 ;
```

```
del tt = 182.5 ;
```

```
% Axis "Precipitation (mm)"
```

```
pmin = 0 ;
```

```
pmax = 100 ;
```

```
del p = 20 ;
```

```
del pp = 10 ;
```

```
% Axis "Secchi (m)"
```

```
smin = 0 ;
```

```
smax = 2 ;
```

```
del s = 1 ;
```

```
del ss = 0.5 ;
```

```
% Axis "Distance (m)"
```

```
Dmin = 0 ;
```

```
Dmax = 60 ;
```

```
del D = 20 ;
```

```
del DD = 5 ;
```

```
% Axis "Water Level (m)"
```

```
Hmin = 2055 ;
```

```
Hmax = 2065 ;
```

```
del H = 5 ;
```

```
del HH = 1 ;
```

```
% Axis "ngood"
```

```
nmin = 0 ;
```

```
nmax = 150 ;
```

```
del n = 50 ;
```

```
del nn = 25 ;
```

```
% Axis "Error"
```

```
difmin = -0.4 ;
```

```
difmax = 0.405 ;
```

```
del dif = 0.1 ;
```

```
del ddi f = 0.1 ;
```

```
% -----
```

```
el seif (ncase == 1)
```

```
% -----
```

```
disp(' Lugar : Cointzio ')

```

```
disp(' Start : 29-Dec-2012 [after many reparations] ')

```

```
disp(' ')

```

```
% Read and rename data files
```

```
eval(['load ' 'codat.dat' ' -ascii']) % Carga datos del LIDAR

```

## Lili.m

```
eval(['load ' 'coref.dat' ' -ascii']) % Carga datos de referencia
eval(['load ' 'cosec.dat' ' -ascii']) % Carga datos de Secchi

datalid = codat ;
dataref = coref ;
datasec = cosec ;

% Name of the lake
lake = 'Cointzio' ;

% Calibration factors
HO = 2006.5929 ; % Datum (msnm)
CosTeta = 0.32576 ; % Cos( Teta)

% Periods with missing data (begin / end) <<<<<<
Dlost = [ [ 2012 01 01 0 00 00 ]' , [ 2012 12 29 0 00 00 ]' ] ;

% Axis limits for plots

% Axis "Time (d)"
xmin = 0 ;
xmax = 1095 ;

xmax = 900

del t = 365 ;
del tt = 182.5 ;

% Axis "Precipitation (mm)"
pmin = 0 ;
pmax = 100 ;
del p = 20 ;
del pp = 10 ;

% Axis "Secchi (m)"
smin = 0 ;
smax = 2 ;
del s = 1 ;
del ss = 0.5 ;

% Axis "Distance (m)"
Dmin = 0 ;
Dmax = 80 ;
del D = 20 ;
del DD = 5 ;

% Axis "Water level (m)"
Hmin = 1985 ;
Hmax = 1995 ;
del H = 5 ;
del HH = 1 ;

% Axis "ngood"
nmin = 0 ;
nmax = 150 ;
del n = 50 ;
```

```

                                Lili.m
del nn = 25 ;

% Axis "Error"
di fmin = -0.4 ;
di fmax = 0.405 ;
del di f = 0.1 ;
del ddi f = 0.05 ;

% -----
else
% -----
error( ' Elegir una opcion valida !... ' )
% -----

end

%=====
%
% DEFINE LOS PARAMETROS PARA LOS CALCULOS
%
%=====

% PARAMETERS FOR COMPUTATION
% -----

%- Nombre minimum de valeurs par jour pour calculer le niveau d'eau
ngood0 = 50 ;

%- Year of reference (time 'zero')
Time0 = [ 2012 05 10 ] ;

%- Numerical 'zero' (calculos en doble precision)
epsilon = 1e-10 ;

% PARAMETERS FOR FIGURES
% -----

%- Grey color (for the plot)
colorg = [ 0.7 0.7 0.7 ] ;

%=====
%
% LEE LOS ARCHIVOS DE DATOS
%
%=====

% Compute incidence angle and display the result
% =====
Teta = acosd( CosTeta ) ; % Teta = incidence angle (deg)

```

```

Lili.m
disp( ' Calibration factors ' )
disp( ' ----- ' )
disp( [ ' HO (m) = ' num2str( HO ) ] )
disp( [ ' cos <Teta> = ' num2str( CosTeta ) ] )
disp( [ ' Teta (deg) = ' num2str( Teta ) ] )
disp( ' ')

% Extrae los datos del LIDAR
% =====

%- Dimensiones de la tabla de datos
[nlid ncol] = size(datalid) ;

if ( ncol ~= 22 )
    disp( ' ')
    error( ' - FATAL ! No hay 22 columnas de datos en <lidar> ' )
end

disp( ' ')
disp( [ ' Numero de datos <lidar> = ' int2str(nlid) ] )

%-----
%- Extract the periods with missing data (begin / end) <<<<<
[nlid, datalid, nlost, tlost] = Filost(datalid, Dlost, epsilon) ;
%-----

%- Define los vectores de datos del Lidar

tlid      = datenum( datalid(: , 1:6) ) ; % Time since 1900 (d)

nrec      = datalid(: , 7) ; % Record (-)
xvolt     = datalid(: , 8) ; % Battery voltaje (V)
xtemp     = datalid(: , 9) ; % Battery temperature (C)

D1        = datalid(: , 10) ; % Distance - 1st mode (m)
K1        = datalid(: , 11) ; % Intensity "K" - 1st mode (-)
I1        = datalid(: , 12) ; % Intensity "I" - 1st mode (-)
J1        = datalid(: , 13) ; % Intensity "J" - 1st mode (-)

D2        = datalid(: , 14) ; % Distance - 2nd mode (m)
K2        = datalid(: , 15) ; % Intensity "K" - 2nd mode (-)
I2        = datalid(: , 16) ; % Intensity "I" - 2nd mode (-)
J2        = datalid(: , 17) ; % Intensity "J" - 2nd mode (-) v

D3        = datalid(: , 18) ; % Distance - 3rd mode (m)
K3        = datalid(: , 19) ; % Intensity "K" - 3rd mode (-)
I3        = datalid(: , 20) ; % Intensity "I" - 3rd mode (-)
J3        = datalid(: , 21) ; % Intensity "J" - 3rd mode (-)

ztemp     = datalid(: , 22) ; % Lidar temperature (C)

% Extrae los datos de referencia
% =====

%- Dimensiones de la tabla de datos
[nref ncol] = size(dataref) ;

```



## Lili.m

```
if ( ncol ~= 9 )
    disp(' ')
    error(' - FATAL ! No hay 9 columnas de datos en <referencia> ')
end

disp(' ')
disp([' Numero de datos <referencia> = ' int2str(nref) ])

%- Define los vectores de datos de referencia

tref      = datenum( dataref(:, 1:6) ) ; % Time since 1900 (d)
pref      = dataref(:, 7)           ; % Précipitation
evref     = dataref(:, 8)           ; % Evaporation
href      = dataref(:, 9)           ; % Hauteur de référence

% Extrae los datos de transparencia (disco de Secchi)
% =====

%- Dimensiones de la tabla de datos

[nsec ncol] = size(datasec) ;

if ( ncol ~= 7 )
    disp(' ')
    error(' - FATAL ! No hay 7 columnas de datos en <Secchi> ')
end

disp(' ')
disp([' Numero de datos <Secchi> = ' int2str(nsec) ])

%- Define los vectores de datos de transparencia (disco de Secchi)

tsec      = datenum( datasec(:, 1:6) ) ; % Time since 1900 (d)
secchi    = datasec(:, 7)           ; % Profondeur de Secchi

% Define el tiempo "0" (primer año del experimento) y sincroniza tiempos
% =====

%- Reference time for computations
% Note: 'Jan-1-0000 00:00:00' returns the number 1.

t0        = datenum( Time0 ) ;

%- Sincroniza los tiempos

tlid      = tlid - t0 ;
tref      = tref - t0 ;
tsec      = tsec - t0 ;
tlost     = tlost - t0 ;

disp(' ')
disp( [ ' Minimum time for Lidar <raw> = ' , num2str(min(tlid)) ] ) ;
disp( [ ' Maximum time for Lidar <raw> = ' , num2str(max(tlid)) ] ) ;

% Select one of the three Lidar modes
% =====
```

## Lili.m

```

if (nmode == 1)
    D = D1 ;
    I = I1 ;
    mode = 'Mode 1 (First)' ;
elseif (nmode == 2)
    D = D2 ;
    I = I2 ;
    mode = 'Mode 2 (Strong)' ;
elseif (nmode == 3)
    D = D3 ;
    I = I3 ;
    mode = 'Mode 3 (Last)' ;
else
    error( ' Elegir una opcion valida ! ' )
end

%=====
%
% EXTRAE LOS DATOS DEL LIDAR: (1) NIVEL DEL AGUA ( "I = 3" )
%
%=====

% Filtra los datos instantaneos (por intensidad)
% =====

fili = ( I == 3 ) ; % Intensity associated to water surface +

tlidw_raw = tlid( fili ) ;
Dw_raw = D( fili ) ;

% Agrupa los datos por dia
% =====

[tlidw, ngoodw, Dw, minDw, maxDw] = Filid( ngood0, tlidw_raw, Dw_raw );

% Avant d'interpoler, definit une plage de temps interpolable
% =====

filo = (tlidw > min(tref)) & (tlidw < max(tref)) ; % Rango de tiempo

tlidwx = tlidw(filo) ; % Tiempos con datos (d)
Dwx = Dw(filo) ; % Valeur du lidar (m)

hlidwx = H0 - Dwx * CosTeta ;

% Interpole les donnees de reference sur les donnees lidar
% =====

hrefwx = interp1( tref, href, tlidwx ) ; % Valores del Lidar (m)
difwx = hlidwx - hrefwx ; % Errores del Lidar (m)

% Estadistica sobre los errores del Lidar
% =====

ecart = difwx( ~isnan(difwx) ) ;

```

## Lili.m

```

di sp(' ')
di sp(' WATER SURFACE > LIDAR ERROR (m) ')
di sp(' ')
di sp( [ ' > Mean      = ' , num2str( mean(ecart)          ) ] ) ;
di sp( [ ' > Std      = ' , num2str( std(ecart)            ) ] ) ;
di sp(' ')
di sp( [ ' > Mi ni ma  = ' , num2str( min(ecart)           ) ] ) ;
di sp( [ ' > Medi an   = ' , num2str( median(ecart)        ) ] ) ;
di sp( [ ' > Maxi ma   = ' , num2str( max(ecart)           ) ] ) ;
di sp(' ')
di sp( [ ' > MRSE     = ' , num2str( mean(sqrt(ecart.^2)) ) ] ) ;
di sp(' ')

%=====
%
% EXTRAE LOS DATOS DEL LIDAR: (2) FLOATING OBJECTS ( "I = 4" )
%
%=====

% Filtra los datos instantaneos (por intensidad)
% =====

fili = ( I == 4 ) ; % Intensity associated to floating object +

tlids_raw = tlid( fili ) ;
Ds_raw    = D( fili ) ;

% Agrupa los datos por dia
% =====

[tlids, ngoods, Ds, minDs, maxDs] = Filid( ngood0, tlids_raw, Ds_raw );

% Avant d'interpoler, definit une plage de temps interpolable
% =====

filo = (tlids > min(tref)) & (tlids < max(tref)) ; % Rango de tiempo

tlidsx = tlids(filo) ; % Tiempos con datos (d)
Dsx    = Ds(filo) ; % Valeur du lidar (m)

hlidsx = H0 - Dsx * CosTeta ;

% xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
% BIDOUILLER > DATE "2014.01.01" POUR ETALONNAGE VALSEQUILLO # 2
%   if ( ncase == 0 )
%       fbid = (tlidsx > t_two) ;
%       hlidsx(fbid) = H0_two - Dsx(fbid) * CosTeta_two ; % <<<<
%   end
% xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx

% Interpole les donnees de reference sur les donnees lidar
% =====

hrefsx = interp1( tref, href, tlidsx ) ; % Valores del Lidar (m)
difsx  = hlidsx - hrefsx ; % Errores del Lidar (m)

```

## Lili.m

```
% Estadística sobre los errores del Lidar
% =====

ecart = difsx( ~isnan(difsx) );

disp(' ')
disp(' SOLID SURFACE > LIDAR ERROR (m) ')
disp(' ')
disp( [ ' > Mean      = ' , num2str( mean(ecart)          ) ] );
disp( [ ' > Std       = ' , num2str( std(ecart)           ) ] );
disp(' ')
disp( [ ' > Minima    = ' , num2str( min(ecart)           ) ] );
disp( [ ' > Median    = ' , num2str( median(ecart)        ) ] );
disp( [ ' > Maxima    = ' , num2str( max(ecart)           ) ] );
disp(' ')
disp( [ ' > MRSE     = ' , num2str( mean(sqrt(ecart.^2)) ) ] );
disp(' ')

%=====
%
% REPRESENTACIONES GRAFICAS
%
%=====

% Titles
% =====

titx = ' Time (d) ' ;
tit = [ lake ' / ' mode ' / ndata > ' num2str(ngood0) ];

% (1) Time steps
% =====

%- Plot number
nfig = 1 ; % <<<<<<

%- Reset the plot
hfig = figure(nfig) ;
close(hfig) ;
figure(nfig) ;

%- Compute time steps
t = tlid( 1 : nlid-1 ) ;
dt = tlid( 2 : nlid ) - tlid( 1 : nlid-1 ) ;
dt = dt * 24 * 60 ; % Convert days to min.

%- Plot the data
semilogy( t , dt , 'r-' , 'LineWidth' , 1.2 )
hold on ;
```

## Lili.m

```
grid
%- Plot the grey areas
    Filling(Dlost, t0, colorg, 10 , 1e6 , epsilon )
%- Add titles
    xlabel ( t i t x )
    ylabel ( 'Time step (min)' )

% (2) Voltage of the datalogging system
% =====
%- Plot number
    nfig = 2          ; % <<<<<<
%- Reset the plot
    hfig = figure(nfig) ;
    close(hfig)        ;
    figure(nfig)       ;
    hold on            ;
%- Plot the data
    plot(tlid, xvolt, 'b-' , 'LineWidth' , 1.2 )
%- Add lower limit (12 V)
    plot( [ xmin , xmax ] , [ 12 , 12 ] , 'r--' , 'Linewidth' , 2 )
%- Plot the grey areas
    Filling(Dlost, t0, colorg, 6 , 16 , epsilon )
%- Add titles
    xlabel ( t i t x )
    ylabel ( 'Battery voltage (V)' )

% (3) Temperature of datalogger and Lidar
% =====
%- Plot number
    nfig = 3          ; % <<<<<<
%- Reset the plot
    hfig = figure(nfig) ;
    close(hfig)        ;
    figure(nfig)       ;
    hold on            ;
%- Plot the data
    plot( tlid , xtemp , 'b-' , 'LineWidth' , 1.2 ) % Datalogger sensor
    plot( tlid , ztemp , 'r:' , 'LineWidth' , 1.2 ) % Lidar sensor
```

## Lili.m

```
%- Plot the grey areas
    Filling(Dlost, t0, colorg, 0 , 50 , epsilon )

%- Add titles
    xlabel ( ti tx )
    ylabel ( ' Temperature (°C) ' )
    title ( ' blue = Datal ogger / red = Li dar ' )

% (4) Représentation des données brutes dans une echelle semi -logarithmique
% =====

%- Plot number
    nfig = 4 ; % <<<<<<

%- Reset the plot
    hfig = figure(nfig) ;
    close(hfig) ;
    figure(nfig) ;

%- Plot all the raw data
    %% semi logy(tlid , D , 'k+' , 'MarkerSize' , 3.0 , 'LineWid th' , 1.0 )
    %% hold on ;

%- Add filtered raw data filtered by intensity (I = 2, 3, 4)

    semi logy(tlid(I == 3), D(I == 3), 'bo', 'MarkerSize' , 3.0 , ...
    'LineWid th' , 0.15 , ...
    'MarkerEdgeCol or' , 'b' , 'MarkerFaceCol or' , [ 0.0 0.0 1.0 ] ) ;
    hold on ;
    grid

    semi logy(tlid(I == 4), D(I == 4), 'gd', 'MarkerSize' , 3.0 , ...
    'LineWid th' , 0.15 , ...
    'MarkerEdgeCol or' , 'g' , 'MarkerFaceCol or' , [ 0.0 0.8 0.0 ] ) ;

    semi logy(tlid(I == 2), D(I == 2), 'ms', 'MarkerSize' , 2.5 , ...
    'LineWid th' , 0.15 , ...
    'MarkerEdgeCol or' , 'm' , 'MarkerFaceCol or' , [ 1.0 0.0 1.0 ] ) ;

    semi logy(tlid(I == 1), D(I == 1), 'k+' , 'MarkerSize' , 2.5 , ...
    'LineWid th' , 0.15 , ...
    'MarkerEdgeCol or' , 'k' , 'MarkerFaceCol or' , [ 0.1 0.1 0.1 ] )

    %% axis( [ xmin xmax 0.1 1000 ] ) ;
    if (ncase == 0)
        axis( [ 000 400 1.0 1000 ] ) ;
```

```

                                Lili.m
    title ( { '(b) Valsequillo' ;' '}, 'fontsize', 12, ...
           'fontweight', 'demi' )

    else

        axis( [ 300 700 1.0 1000 ] ) ;

        title ( { '(a) Cointzio' ;' '}, 'fontsize', 12, ...
               'fontweight', 'demi' )

    end

%- Plot the grey areas

    Filling(Dlost, t0, colorg, 1.0 , 1000 , epsilon )

%- Add titles

    xlabel ( { ' ' ;'Tiempo (d)' } , ...
            'Fontname', 'Helvetica', 'FontSize', 14, 'FontWeight', 'bold', ...
            'Horizontal Alignment', 'center', 'Vertical Alignment', 'middle' )

    ylabel ( { ' Distancia (m) ' ;' ' } , ...
            'Fontname', 'Helvetica', 'FontSize', 14, 'FontWeight', 'bold', ...
            'Horizontal Alignment', 'center', 'Vertical Alignment', 'middle' ) ;

%- Define grueso de lines

    set(gca, 'LineWidth', 1.2)
    set(gca, 'Units', 'centimeters');

%- Posiciona el gráfico en la hoja de papel
    left   = 2 ;
    bott   = 2 ;
    width  = 8 ;
    height = 12 ;
    set(gca, 'Position', [left, bott, width, height]);

% (5) Precipitation
% =====

%- Plot number

    nfig = 5 ; % <<<<<<

%- Reset the plot

    hfig = figure(nfig) ;
    close(hfig) ;
    figure(nfig) ;
    hold on ;

%- Plot the data

    plot( tref , pref , 'b-' )

%- Add titles

    xlabel ( tix )

```

```

    ylabel ( ' Rain (mm/d) ' )
%- Improve the plot (if kfig = 1)
    if (kfig == 1)
        esfig(xmin, xmax, del t, del tt, pmin, pmax, del p, del pp, titx, ...
            ' Rain (mm/d) ', ' (a)', 2) ;
        title (tit)
    end

% (6) Secchi
% =====
%- Plot number
    nfig = 6 ; % <<<<<<

%- Reset the plot
    hfig = figure(nfig) ;
    close(hfig) ;
    figure(nfig) ;
    hold on ;

%- Plot the data
    plot( tsec , secchi , 'b--' , 'LineWidht' , 1.2 )
    plot( tsec , secchi , 'bo' , 'Markersize' , 4.2 , 'LineWidht' , 4.0, ...
        'MarkerEdgeColor' , 'k' , 'MarkerFaceColor' , [ 0.0 0.0 1.0 ] );

    grid

%- Add titles
    xlabel ( titx )
    ylabel ( ' Secchi (m) ' )

%- Improve the plot (if kfig = 1)
    if (kfig == 1)
        esfig(xmin, xmax, del t, del tt, smin, smax, del s, del ss, titx, ...
            ' Secchi (m) ', ' (a)', 2) ;
        title (tit)
    end

% (7) Water Level
% =====
%- Plot number
    nfig = 7 ; % <<<<<<

%- Reset the plot
    hfig = figure(nfig) ;

```



```

                                                    Lili.m
close(hfig)           ;
figure(nfig)         ;
hold on              ;

%- Plot the data
plot(tlidwx , hrefwx, 'r-' , 'LineWidth' , 1.1 )
plot(tlidwx , hlidwx, 'bo' , 'Markersize' , 3 , 'LineWidth' , 1.2 )
plot(tlidsx , hlidsx, 'gd' , 'Markersize' , 3 , 'LineWidth' , 2.2 )

%- Plot the grey areas
Filling(Dlost, t0, colorg, Hmin , Hmax , epsilon )

%- Add titles
xlabel( titx )
ylabel( ' H (m) ' )
title ( [ tit ' - Reference o Lidar' ] )

%- Improve the plot (if kfig = 1)
if (kfig == 1)
    esfig(xmin, xmax, del t, del tt, Hmin, Hmax, del H, del HH, titx, ...
    ' H (m) ' , ' (a)' , 2) ;
    title (tit)
end

% (8) Lidar error
% =====

%- Plot number
nfig = 8           ; % <<<<<<

%- Reset the plot
hfig = figure(nfig) ;
close(hfig)       ;
figure(nfig)      ;
hold on           ;

%- Plot the data
plot( tlidwx , difwx , 'ro' , 'Markersize' , 4.0 , 'LineWidth' , 1.0, ...
'MarkerEdgeColor' , 'k' , 'MarkerFaceColor' , [ 1.0 0.0 0.0 ] );

plot( tlidsx , difsx , 'gd' , 'Markersize' , 4.0 , 'LineWidth' , 1.0, ...
'MarkerEdgeColor' , 'k' , 'MarkerFaceColor' , [ 0.0 1.0 0.0 ] );

grid

%- Plot the grey areas

```

```

                                L i l i . m
    Filling(Dlost, t0, colorg, di fmin , di fmax , epsilon )
%- Add titles
    xlabel( titx )
    ylabel( ' Error (m) ' )
%- Improve the plot (if kfig = 1)
    if (kfig == 1)
        esfig(xmin, xmax, del t, del tt, di fmin, di fmax, del di f, ...
            del ddi f, titx, ' Error (m)', '(d)', 2) ;
        title (tit)
    end

% (9) ngood
% =====
%- Plot number
    nfig = 9 ; % <<<<<<
%- Reset the plot
    hfig = figure(nfig) ;
    close(hfig) ;
    figure(nfig) ;
    hold on ;

%- Plot the data
    plot( tlidw , ngoodw , 'r-' , 'Li neWi dth' , 1.2 )
    plot( tli ds , ngoods , 'g-' , 'Li neWi dth' , 1.2 )

    plot( [ xmin xmax ] , [ ngood0 ngood0 ] , 'b--' , 'Li neWi dth' , 1.2 )
%- Plot the grey areas
    Filling(Dlost, t0, colorg, nmin , nmax , epsilon )
%- Add titles
    xlabel( titx )
    ylabel( ' ngood (-) ' )
%- Improve the plot (if kfig = 1)
    if (kfig == 1)
        esfig(xmin, xmax, del t, del tt, nmin, nmax, del n, del nn, titx, ...
            ' ngood ', '(e)', 2) ;
        title (tit)
    end
end

```

## Lili.m

```
% (10) Plates with main results
% =====

%- Plot number
    nfig = 10          ; % <<<<<<

%- Reset the plot
    hfig = figure(nfig) ;
    close(hfig)         ;
    figure(nfig)        ;
    hold on             ;

%- Define tipo de texto
    cardim = 11 ;
    set(gca, 'Fontname', 'Helvetica', 'FontSize', cardim, 'FontWeight', 'bold')

%- Sub-plot (a) : Secchi
%-----
    subplot(4,1,1), plot( tsec , secchi , 'r-', 'LineWidth' , 0.8 );
    hold on
    subplot(4,1,1), plot( tsec , secchi , 'rd' , 'MarkerSize' , 3.0 , ...
        'LineWidth' , 1.5 );
    subplot(4,1,1), plot ( [xmin xmax] , [ 1.4 1.4 ] , 'k-' , ...
        'LineWidth' , 1.0 ) ;

    subplot(4,1,1), Filling(Dlost, t0, colorg, smin , smax , epsilon )

    ylabel ( {' Secchi (m)'; ' '; ' ' }, 'fontSize', cardim, 'fontWeight', 'b')
    axis([xmin xmax smin smax])

    gtext( '(a)' , 'Clipping', 'off', 'Rotation', 0, ...
        'Fontname', 'Helvetica', 'FontSize', cardim+2, 'FontWeight', 'bold', ...
        'HorizontalAligment', 'center', 'VerticalAligment', 'middle') ;

%- Sub-plot (b) : Water level
%-----
    subplot(4,1,2), plot(tlidwx , hrefwx , 'k-' , 'LineWidth' , 0.8 )
    hold on
    subplot(4,1,2), plot(tlidwx , hlidwx , 'bd' , 'MarkerSize' , 1.6 , ...
        'LineWidth' , 1.6 )
    hold on
    subplot(4,1,2), plot(tlidsx , hlidsx , 'gd' , 'MarkerSize' , 1.6 , ...
        'LineWidth' , 1.6 )
```

## Lili.m

```
subplot(4,1,2), Filling(Dlost, t0, colorg, Hmin, Hmax, epsilon)

ylabel( {'Tirante (msnm)'; ' '}, 'fontsize', cardim, 'fontweight', 'b' )
axis([xmin xmax Hmin Hmax])

    gtext( '(b)', 'Clipping', 'off', 'Rotation', 0, ...
    'Fontname', 'Helvetica', 'FontSize', cardim+2, 'FontWeight', 'bold', ...
    'HorizontalAligment', 'center', 'VerticalAligment', 'middle' );

%- Sub-plot (c) : Lidar Error
%-----

subplot(4,1,3), plot( tliwdx, di fwx, 'bd', 'Markersize', 2.0, ...
'LineWidth', 1.5 );

hold on

subplot(4,1,3), plot( tli dsx, di fsx, 'gd', 'Markersize', 2.0, ...
'LineWidth', 1.5 );

hold on

subplot(4,1,3), plot( [xmin xmax], [ 0.0 0.0 ], 'k--', ...
'LineWidth', 1.0 );

subplot(4,1,3), plot( [xmin xmax], [ 0.1 0.1 ], 'k-', ...
'LineWidth', 1.0 );

subplot(4,1,3), plot( [xmin xmax], [ -0.1 -0.1 ], 'k-', ...
'LineWidth', 1.0 );

subplot(4,1,3), Filling(Dlost, t0, colorg, di fmin, di fmax, epsilon)

ylabel( {'Error (m)'; ' '}, 'fontsize', cardim, 'fontweight', 'b' )
axis( [ xmin xmax di fmin di fmax ] )

    gtext( '(c)', 'Clipping', 'off', 'Rotation', 0, ...
    'Fontname', 'Helvetica', 'FontSize', cardim+2, 'FontWeight', 'bold', ...
    'HorizontalAligment', 'center', 'VerticalAligment', 'middle' );
```

```
%- Sub-plot (d) : ngood
%-----

subplot(4,1,4), plot( tli dw, ngoodw, 'b-', 'LineWidth', 1.13 )

hold on

subplot(4,1,4), plot( tli ds, ngoods, 'g-', 'LineWidth', 1.13 )

hold on
```

```

                                Lili.m
subplot(4,1,4), plot ( [xmi n xmax] , [ ngood0 ngood0 ] , 'k-' , ...
'LineWidth' , 1.0 ) ;

subplot(4,1,4), Filling(Dlost, t0, colorg, nmi n , nmax , epsilon )
    ylabel ( {' Datos por día' ; ' ' }, ' fontsi ze' , cardi m, ' fontwei ght' , ' b' )
    axis([xmi n xmax nmi n nmax])

%- Add xlabel at the last sub-plot
%-----
    xlabel ( { ' ' ; 'Tiempo (d)' }, ' fontsi ze' , cardi m, ' fontwei ght' , ' b' )

    gtext( '(d)' , ' Clippi ng' , ' off' , ' Rotati on' , 0, ...
' Fontname' , ' Hel veti ca' , ' FontSi ze' , cardi m+2, ' FontWei ght' , ' bold' , ...
' Hori zontal Al i gnment' , ' center' , ' Verti cal Al i gnment' , ' mi ddle' ) ;

%=====
%
% FIN DEL PROGRAMA
%
%=====

```

## Fi lost.m

```
function [nlid, datalid, nlost, tlost] = Filost(datalid, Dlost, epsilon)
% =====
% Extract the periods with missing data (begin / end)
% =====

% Convert and check the array of missing data
% =====

%- Convert date to universal time (days)
    tlost = datenum( Dlost ) ;
    [ nlost nc ] = size( tlost ) ;

%- Check that there is a pair number of data (begin / end)
    diff_check = round(nlost / 2) - (nlost / 2) ;
    if ( abs( diff_check ) > epsilon )
        error(' FATAL ! Check the file of lost data [1]... ')
    end

%- Check that the times are increasing
    del_check = tlost(2 : nlost) - tlost(1 : nlost-1) ;
    fil_check = (del_check <= 0) ;
    if ( sum( fil_check ) > 0 )
        error(' FATAL ! Check the file of lost data [2]... ')
    end

% Preliminary definition of the time for the raw data (lidar file)
% =====
    tlid = datenum( datalid(: , 1:6) ) ; % Time since 1900 (d)

% Remove data for some periods with missing data
% =====

%- Define the filter
    flost = (tlid > tlost(1)) & (tlid < tlost(2)) ;
    if nlost >= 4
        for il = 3 : 2 : nlost
            flosti = (tlid > tlost(il)) & (tlid < tlost(il+1)) ;
            flost = flost | flosti ;
        end
    end
```

Fi lost.m

```
end
end
flost = ~ flost ;
%- Check that filter is well defined
if ( abs( sum(flost) ) < epsilon )
    error( ' FATAL - Check Fi lost.m ' )
end
%- Remove the data
datalid = datalid( flost , : ) ;
[ nlid nc ] = size( datalid ) ;

% =====
end
% =====
```

## Filid.m

```
function [tlidx, ngoodx, Dx, minDx, maxDx] = Filid(ngood0, tcumf, Df)

%=====
%
% Filter traiting datas by creation of the daily median
%
% Author:      Serge      (04/07/2014)
%
%=====

% Initialize the output matrix
% =====

Nday = fix( max( tcumf ) ) ; % Number of days
Nresu = 5 ; % Column number
Matout = NaN * ones(Nday, Nresu) ; % Matrix generation

% Parameter definition
% =====

Di inf = 1 ; % Irrealistic value of Di, lower bound (m)
Di sup = 100 ; % Irrealistic value of Di, superior bound (m)

kplot = 0 ; % Initialization for the plot of histograms
nligplot = 6 ;
ncolplot = 6 ;

% Daily loop
% =====

for iday = 1 : Nday

    filtrei = (tcumf >= iday) & (tcumf < iday+1) ;
    ngood = sum( filtrei ) ;

    if ( ngood < ngood0 ) ;
        Di = NaN ;
    else
        Di = Df( filtrei ) ; % Keep the data for one given day

    % -----
```



```

    fi di    = (Di < Di sup) & (Di > Di inf) ; % >>> REMOVE EXTREME
    Di      = Di ( fi di ) ;

% -----

    i f ( sum(Di) == 0 ) ; % No positive result
        Di = NaN ;
    end
end

% -----

% Histograms representing daily values repartition
nplot    = nligplot * ncolplot ;
figure(100)
i f ( ngood > ngood0 )
    kplot = kplot + 1 ;
    i f (kplot <= nplot)
        subplot( nligplot , ncolplot , kplot)
        hist( Di , 80 ) ;
    end
end

% -----

% Median selection
Dmed = median( Di ) ;
%% Dmed = statis( Di , 25 ) ; % >>> ALTERNATIVE: TRY PERCENTILE

% Minimum and maximum
minD = min( min( Di ) ) ;
maxD = max( max( Di ) ) ;

% definition of Matout matrix
datout = [ iday ngood Dmed minD maxD ] ;
Matout( iday , : ) = datout ;

```

Fi l i d . m

end

% stockage of elements from Matout matrix in vectors

% =====

tlidx = Matout( : , 1 ) + 0.5 ; % >>> SET TIME AT MIDDAY (12:00)  
ngoodx = Matout( : , 2 ) ;

Dx = Matout( : , 3 ) ;

mi nDx = Matout( : , 4 ) ;  
maxDx = Matout( : , 5 ) ;

%=====

## Statis.m

```
funcion [y] = statis(x,i)
% -----
% Funcion:      stati.m
%
% Objetivo:    Funcion que hace calculos estadisticos basicos
%
%              Se calculan los percentiles de un vector 'x'
%              El parametro 'i' es el percentil (0 - 100)
%              i = 0 -> Minimo
%              i = 25 -> primer cuartil
%              i = 50 -> segundo cuartil (mediana)
%              i = 75 -> tercer cuartil
%              i = 100 -> Maximo
%
% Nota:        La funcion devuelve un valor indefinido ('NaN')
%              si hay menos de 2 valores en el vector 'x'
%              o si este vector contiene valores indefinidos
%
% Referencia:  - Función 'median' de la biblioteca Matlab
%
% Autor:       Serge Tamari (20/03/2008)
%              Revisión    (04/07/2014)
% -----

% Dimensiones del vector de entrada
% =====

[m,n] = size(x);

% Verificaciones preliminares
% =====

%- Verifica que i es un entero
if (i ~= round(i))
    error(' STATIS - Error = i debe de ser un entero...')
end

%- Verifica que el valor de i es congruente
if (i < 0) | (i > 100)
    error(' STATIS - Error = i debe de ser entre 0 y 100 % ...')
end

%- Verifica que x es un vector
if (n ~= 1)
    disp(' STATIS - Error = x no es un vector = columna...')
end

%- Verifica que x contiene por lo menos 2 datos
if (m < 2)
    disp(' STATIS - Error = x contiene menos de 2 datos...')
end

%- Verifica que x no contiene datos indefinidos
if (sum(isnan(x)) ~= 0)
    disp(' STATIS - Error = x contiene datos indefinidos...')
end

% Calculos
% =====
```

## Statis.m

```
if (n == 1) & (m > 1) & (sum(isnan(x)) == 0)
    %- Ordena los valores de x
    x = sort(x);

    %- Determina el valor más cerca del índice buscado
    kz = (i/100.)*(m-1) + 1 ;

    %- Determina la 'porción fraccional' de k
    f = kz - floor(kz) ;

    %- Redondea k hacia 'menos infinito'
    k = floor(kz) ;

    %- Encuentra el valor del percentil (mediante una interpolación)
    if (f == 0) ;
        y = x(k) ;
    else
        y = x(k) + f*( x(k+1) - x(k) ) ;
    end

else
    %- Cálculo imposible
    y = NaN ;
end
% -----
```

esfig.m

funcion esfig(xmin, xmax, dx, dxx, ymin, ymax, dy, dyy, titx, tity, code, post)

```
%-----  
%  
%- Objetivo  
%  
% Mejora la calidad de un grafico  
%  
% cf: opciones 'gca' y 'gcf' (con las funciones 'help' y 'get')  
%  
%- Principales Variables:  
%  
% xmin = valor minimo de 'x'  
% xmax = valor maximo de 'x'  
% ymin = valor minimo de 'y'  
% ymax = valor maximo de 'y'  
%  
% titx = titulo del eje 'x'  
% tity = titulo del eje 'y'  
%  
% code = titulo del grafico  
%  
% post = posicion del titulo  
% 0-center  
% 1-left/down  
% 2-left/up  
% 3-right/up  
% 4-right/down  
%  
%- Autor:  
%  
% S. Tamari (Matlab - 1996)  
% Revisión (2010-06-28)  
% Revisión (2014.07.03)  
%-----  
  
%- Espacio para valores sobre los ejes @@@  
  
% titcx = [xmin : dx : xmax] ;  
% titcy = [ymin : dy : ymax] ;  
  
%- Espacio para marcas sobre los ejes @@@  
  
% titcxx = [xmin : dxx : xmax] ;  
% titcyy = [ymin : dyy : ymax] ;  
  
%-----  
  
%- Limites del grafico  
  
% axis([xmin xmax ymin ymax])  
  
%-----  
  
% Configura el grafico  
  
%- Dimensiones del grafico  
  
% cardim = 16 ;
```

esfig.m

```
left = 6 ;  
bott = 4 ;  
width = 18 ;  
height = 10 ;
```

%- Borra títulos anteriores

```
title(' ')  
xlabel(' ')  
ylabel(' ')
```

%- Aspecto del gráfico

```
%% set(gca, 'AspectRatio', [NaN NaN]) <<< OBSOLETE ???
```

%- Pone marcas al rededor de todo el gráfico

```
set(gca, 'Box', 'on')
```

%- Define tipo de texto

```
set(gca, 'Fontname', 'Helvetica', 'FontSize', cardim, 'FontWeight', 'bold')
```

%- Define grueso de líneas

```
set(gca, 'LineWidth', 1.2)  
set(gca, 'Units', 'centimeters');
```

%- Posiciona el gráfico en la hoja de papel

```
set(gca, 'Position', [left, bott, width, height]);
```

%- Tipos de indentaciones

```
set(gca, 'TickDir', 'in');
```

%- Opción para pasar en 'negativo' durante la impresión

```
%% set(gcf, 'InvertHardcopy', 'on') <<< SIRVE ???
```

%-----

% Texto sobre los ejes

%- Título del eje horizontal

```
del y = (ymax-ymin)/10 ;  
del x = (xmax-xmin)/10 ;
```

```
tx = (xmax+xmin)/2 ;  
ty = ymin - 1.8*del y ;  
text(tx, ty, title, 'Clipping', 'off', ...  
'Fontname', 'Helvetica', 'FontSize', cardim+4, 'FontWeight', 'bold', ...  
'HorizontalAlignment', 'center', 'VerticalAlignment', 'middle');
```

%- Título del eje vertical

```
tx = xmin - 1.6*del x ;  
ty = (ymax+ymin)/2 ;  
text(tx, ty, title, 'Clipping', 'off', 'Rotation', 90, ...  
'Fontname', 'Helvetica', 'FontSize', cardim+4, 'FontWeight', 'bold', ...
```

```

                                esfig.m
    ' Horizontal Al i gnment' , ' center' , ' Verti cal Al i gnment' , ' mi ddl e' ) ;
%-----
% Texto adici onal

if (post == 0) ; % Center - Up
    text((xmi n+xmax)/2, ymax+1.4*del y, code, ' Cl i ppi ng' , ' off' , ...
    ' Fontname' , ' Hel veti ca' , ' FontSi ze' , cardi m+2, ' FontWei ght' , ' bol d' , ...
    ' Hori zontal Al i gnment' , ' center' , ' Verti cal Al i gnment' , ' mi ddl e' ) ;

el sei f (post == 1) ; % Left - Down
    text(xmi n+del x, ymi n+del y, code, ' Cl i ppi ng' , ' off' , ...
    ' Fontname' , ' Hel veti ca' , ' FontSi ze' , cardi m+2, ' FontWei ght' , ' bol d' , ...
    ' Hori zontal Al i gnment' , ' l eft' , ' Verti cal Al i gnment' , ' mi ddl e' ) ;

el sei f (post == 2) ; % Left - Up
    text(xmi n+del x, ymax-del y, code, ' Cl i ppi ng' , ' off' , ...
    ' Fontname' , ' Hel veti ca' , ' FontSi ze' , cardi m+2, ' FontWei ght' , ' bol d' , ...
    ' Hori zontal Al i gnment' , ' l eft' , ' Verti cal Al i gnment' , ' mi ddl e' ) ;

el sei f (post == 3) ; % Ri ght - Up
    text(xmax-del x, ymax-del y, code, ' Cl i ppi ng' , ' off' , ...
    ' Fontname' , ' Hel veti ca' , ' FontSi ze' , cardi m+2, ' FontWei ght' , ' bol d' , ...
    ' Hori zontal Al i gnment' , ' ri ght' , ' Verti cal Al i gnment' , ' mi ddl e' ) ;

el se ; % Ri ght - Down
    text(xmax-del x, ymi n+del y, code, ' Cl i ppi ng' , ' off' , ...
    ' Fontname' , ' Hel veti ca' , ' FontSi ze' , cardi m+2, ' FontWei ght' , ' bol d' , ...
    ' Hori zontal Al i gnment' , ' ri ght' , ' Verti cal Al i gnment' , ' mi ddl e' ) ;

end
%-----
% Incremento sobre los ej es
%- Numeros sobre el eje horizontal
[i ntx] = size(ticx) ;
ty = ymi n - 0.7*del y ;
for i = 1:ntx ;
    tx = ticx(:, i);
    text(tx, ty, num2str(tx, 7), ' Cl i ppi ng' , ' off' , ...
    ' Fontname' , ' Hel veti ca' , ' FontSi ze' , cardi m, ' FontWei ght' , ' demi' , ...
    ' Hori zontal Al i gnment' , ' center' , ' Verti cal Al i gnment' , ' mi ddl e' ) ;
end
%- Numeros sobre el eje vertical
[i nty] = size(ticy) ;
tx = xmi n - 0.3*del x ;
for i = 1:nty ;
    ty = ticy(:, i);

```

```
                                esfig.m
text(tx, ty, num2str(ty, 7), 'Clipping', 'off', ...
'Fontname', 'Helvetica', 'FontSize', cardim, 'FontWeight', 'demi', ...
'HorizontalAlignment', 'right', 'VerticalAlignment', 'middle');
end
```

%- Marcas sobre los ejes

```
v = [ 0.012    0.0012 ] ;
set(gca, 'XTick', ticxx, 'XTickLabel', ' ', 'TickLength', v) ;
set(gca, 'Ytick', ticyy, 'YTickLabel', ' ', 'TickLength', v) ;
```

%-----



## **Anexo C.1**

**Informe de una orden de servicio  
para reparar un Lidar**



## Informe sobre el Servicio:

### Reparación y re-instalación de un láser infrarrojo (Lidar) en "Valsequillo" (Pue.)



**Subcoordinación de Hidráulica Ambiental**

**Serge Tamari**

**Marzo de 2014**

## 1 Antecedentes

Como alternativa a los métodos tradicionales que son difíciles de implementar en embalses de tierra, el personal del IMTA está tratando de monitorear el tirante en embalses con agua turbia por medio de instrumentos tipo Lidar (distanciómetro laser infrarrojo) colocados en la orilla e inclinados con un ángulo de incidencia grande en la práctica (desde 25 hasta 75°).

En este contexto, se han instalado hace dos años un Lidar en el embalse de "Cointzio" (Mich.) y otro en el embalse de "Valsequillo" (Pue.). Los instrumentos toman mediciones cada 10 minutos, y las transmiten mediante telemetría celular.

Desafortunadamente, el Lidar colocado en el embalse de "Valsequillo" (Pue.) dejo de transmitir datos a finales de 2013. Por lo tanto, se solicitó un servicio para reparar e reinstalar dicho sistema de medición; esto se hizo en el marco del proyecto HC-1411.1 *"Monitoreo del nivel del agua con un Lidar inclinado"*.

## 2 Actividades

En marzo del 2014, el personal de la empresa PVDIM SA de CV fue al embalse de "Valsequillo" (Pue.) para revisar el Lidar instalado en el sitio. Se diagnosticaron y se corrigieron los siguientes problemas:

- *Alimentación eléctrica del sistema* - La batería de respaldo (batería sellada de 12 Voltios, para aplicaciones fotovoltaicas) ya no se recargaba bien, después de dos años de uso. Por lo tanto, se cambio dicha batería (**Figura 1**).
- *Telemetría celular* - Se tenían a menudo dificultades para recibir los datos mediante telemetría celular. Después de haber diagnosticado un cambio en las condiciones electromagnéticas alrededor del sitio de medición, se procedió a re-orientar la antena celular (de tipo direccional), encontrando condiciones favorables (**Figura 2**). Asimismo, se cambió el *chips* del modem celular.
- *Limpieza y re-instalación del Lidar* - Se desmontó el Lidar para inspeccionarlo (**Figura 3**). Después de haber limpiado su lente, se verificó por medio de un *software* proporcionado por el fabricante ("Laser Technologies", que el instrumento estaba operando adecuadamente. Al momento de re-instalar el Lidar, se verifico su ángulo de incidencia ( $64^\circ$ ) con un inclinómetro de la marca "Mitutoyo" (**Figura 4**).

### 3 Conclusión

Después de haber revisado el medidor, la alimentación eléctrica y la telemetría celular, se dejó funcionando adecuadamente el sistema Lidar instalado en el embalse de "Valsequillo" (Pue.).



## ANEXO FOTOGRÁFICO



Figura 1. Cambio de batería.



Figura 2. Re-orientación de la antena celular.



Figura 3. Inspección y limpieza del Lidar



Figura 4. Verificación del ángulo de incidencia.





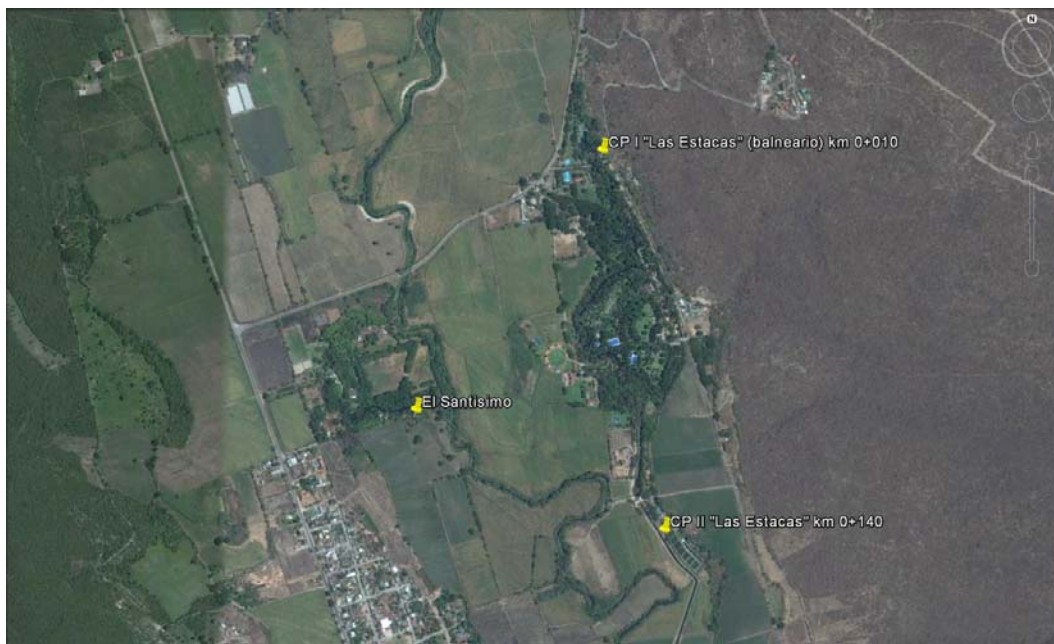
## **Anexo C.2**

**Informe de una orden de servicio  
para geoposicionar puentes de aforo  
en Morelos**



## Informe sobre el Servicio:

### **Servicio para geoposicionar y caracterizar 24 puentes de aforo en el Estado de Morelos**



**Subcoordinación de Hidráulica Ambiental**

**Serge Tamari**

**Noviembre de 2014**

## **1 Antecedentes**

Por un lado, el Distrito de Riego 016 "Morelos" (Mor.) tiene más de 60 puntos de control, es decir: lugares donde se afora para controlar el volumen de agua que se entrega a los usuarios. Hasta la fecha, solo se ha instrumentado el Canal Principal II "Las Estacas" km 0+105, porque es el sitio con mayor caudal (aprox. 6 m<sup>3</sup>/s). Sin embargo, es importante conocer las necesidades de los otros puntos de control para la Hidrometría; en particular, se requieren reparar o instalar puentes de aforo en varios sitios, según el personal del Distrito de Riego.

Por otro lado, el Distrito de Riego 016 "Morelos" (Mor.) está cerca del IMTA. En este caso, conviene ubicar y conocer sus principales puntos de control, para saber donde se podrían planear en el futuro experimentos de campo relacionados con la Hidrometría: probar nuevas técnicas para monitorear el tirante y/o el caudal.

Por lo anterior, se ha solicitado un servicio para geoposicionar y caracterizar 24 puntos de control a cargo del Distrito de Riego 016 "Morelos", con los siguientes propósitos: (1) saber si estos los requieren la reparación o el suministro de un puente de aforo e (2) identificar sitios donde se podrían probar nuevas técnicas de Hidrometría.

## 2 Actividades

A finales de octubre del 2014, el personal de la empresa DISIME SA de CV fue al Distrito de Riego 016 "Morelos" (Mor.) para visitar una serie de puntos de control junto con la persona encargada de los aforos. Las actividades fueron las siguientes:

- *Definición de los sitios por visitarse* - Junto con el personal del Distrito de Riego, se estableció una lista de 29 sitios por visitarse, porque requieren de un puente de aforo. Se registraron su nombre completo, junto con el municipio.
- *Geoposicionamiento de los sitios* - En el campo, se registraron las coordenadas geográficas de cada sitio con un GPS (modelo "eTrex-30", marca "Garmin"). Después, se ubicaron los sitios en *Google Earth*, y se corrigió ligeramente la posición de cada sitio con base a un análisis de las imágenes satelitales (considerando que la incertidumbre del GPS era de hasta 10 metros).
- *Caracterización de los sitios* - Durante los trabajos de campo, se tomaron fotografías de cada sitio (vistas hacía aguas arriba y hacía aguas abajo). También se midió el ancho de los canales con un distanciómetro láser (modelo "Disto", marca "Leica").

### 3 Conclusión

Después de haber visitado una serie de 29 puntos de control en el Estado de Morelos, se geoposicionaron los sitios y se definieron sus características básicas para poder suministrar puentes de aforo.

Los principales resultados del estudio se presentan en el siguiente Cuadro:

CARACTERIZACIÓN DE PUNTOS DE CONTROL EN EL DR-016 "MORELOS" (MOR.)

No.	Sitio	Municipio	DATOS CRUDOS (GPS)		DATOS CORREGIDOS		CORREGIDOS - CRUDOS		PUENTE AFORO
			Norte	Oeste	Norte	Oeste	Norte	Oeste	Ancho (m)
1	CP "Tetecala" (km 0+100)	Tetecala	18.726944	-99.401639	18.726803	-99.401539	-0.0001	0.0001	4.52
2	Canal "Apartle chico" (km 0+140)	Coatlan	18.747583	-99.444028	18.747561	-99.444154	0.0000	-0.0001	1.31
3	Canal "Apartle grande" (km 0+300)	Coatlan	18.743528	-99.436750	18.743528	-99.436750	0.0000	0.0000	2.05
4	Canal "Las Virginiás" (km 0+700)	Coatlan	18.762944	-99.457139	18.762944	-99.457139	0.0000	0.0000	1.93
5	Canal "San Gabriel" (km 0+020)	Amacuzac	18.642139	-99.349806	18.642052	-99.349861	-0.0001	-0.0001	2.32
6	Canal "El Salado" (km 0+060)	Amacuzac	18.658972	-99.355833	18.658940	-99.355857	0.0000	0.0000	1.22
7	Toma # 1 del río "Apatlaco" (km 0+150)	Temixco	18.865806	-99.220333	18.865766	-99.220360	0.0000	0.0000	1.76
8	Toma # 4 del río "Apatlaco" (km 9+980)	Xochitepec	18.770222	-99.237833	18.770256	-99.237810	0.0000	0.0000	2.89
9	Canal "Santa Rosa" (km 0+090)	Xochitepec	18.783028	-99.203667	18.783040	-99.203539	0.0000	0.0001	1.64
10	Canal "La Cienega" (km 0+430)	Zapata	18.836750	-99.206528	18.836658	-99.206494	-0.0001	0.0000	1.45
11	Canal "Las Fuentes" (balneario) (km 0+100)	Jiutepec	18.876611	-99.165750	18.876594	-99.165671	0.0000	0.0001	9.38
12	Canal "Chapultepec" (km 1+300)	Cuernavaca	18.908861	-99.209333	18.908786	-99.209362	-0.0001	0.0000	2.84
13	Canal "El Zapotal" (km 0+510)	Tlaltizapan	18.726444	-99.162667	18.726444	-99.162729	0.0000	-0.0001	2.69
14	Canal "La Meza" (km 1+570)	Tlaltizapan	18.720917	-99.158250	18.720917	-99.158250	0.0000	0.0000	2.82
15	Toma# 10 del río "Yautepec" (km 1+800)	Tlaltizapan	18.698500	-99.113278	18.698500	-99.113278	0.0000	0.0000	2.37
16	CP "Las Estacas" (balneario) (km 0+010)	Tlaltizapan	18.733833	-99.113694	18.733836	-99.113825	0.0000	-0.0001	1.62
17	Toma# 8 del río "Yautepec" (km 0+490)	Tlaltizapan	18.808083	-99.102278	18.808033	-99.102485	-0.0001	-0.0002	2.07
18	Toma# 11 del río "Yautepec" (km 0+480)	Tlaltizapan	18.664250	-99.142556	18.664231	-99.142575	0.0000	0.0000	1.53
19	Canal "Dulce" (km 2+500)	Tlaltizapan	18.664250	-99.145306	18.664052	-99.145349	-0.0002	0.0000	6.36
20	Toma# 12 del río "Yautepec" (km 2+570)	Tlalquitenango	18.608806	-99.154833	18.608848	-99.154900	0.0000	-0.0001	2.21
21	Toma# 7 del río "Apatlaco" (km 0+050)	Jojutla	18.639056	-99.193250	18.638989	-99.193152	-0.0001	0.0001	2.51
22	Canal "Las Iguanas" (km 0+950)	Ayala	18.696694	-98.976556	18.696803	-98.976498	0.0001	0.0001	3.05
23	Canal "El Mirador" (km 0+170)	Ayala	18.683778	-98.986333	18.683778	-98.986333	0.0000	0.0000	8.03
24	Canal "Las Tortugas" (km 0+390)	Ayala	18.744750	-98.978444	18.744728	-98.978691	0.0000	-0.0002	1.21
25	Canal "El Axocoche" (km 0+250)	Ayala	18.751972	-98.986833	18.751972	-98.986833	0.0000	0.0000	1.22
26	Canal "San Esteban" (km 0+290)	Ayala	18.760528	-98.962500	18.760528	-98.962500	0.0000	0.0000	3.02
27	Canal "Los Tomases" (km 0+030)	Ayala	18.784167	-98.985389	18.784167	-98.985389	0.0000	0.0000	1.81
28	Canal "La Colmena" (km 0+030)	Cuautla	18.813833	-98.945667	18.813593	-98.945590	-0.0002	0.0001	3.84
29	Canal "La Mora" (km 0+470)	Cuautla	18.827139	-98.938250	18.827097	-98.938259	0.0000	0.0000	2.01

# ANEXO FOTOGRÁFICO



Ubicación de los sitios en el Estado de Morelos.  
*(los límites oficiales del Distrito de Riego 016 están indicados en verde)*



CP Tetecala



Apantle chico.



Apantle grande



Las Virginias



San Gabriel



El Salado





Toma 1 del río Apatlaco



Toma 4 del río Apatlaco



Santa Rosa



La Cienega



Las Fuentes



Chapultepec



El Zapotal



La Meza



Toma 10 del río Yautepec



CP I Las Estacas



Toma 8 del río Yautepec



Toma 11 del río Yautepec